

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ksenija Gašparić**

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Gojko Marić, dipl. ing.

Student:

Ksenija Gašparić

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prije svega svom mentoru Doc. dr. sc. Gojku Mariću koji mi je pomogao u realizaciji diplomskog rada.

Također se zahvaljujem dr. sc. Zlati Hrnjak- Murgić na savjetima i ustupljenom prostoru na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije.

Hvala dr. sc. Ljerki Kratofil-Krehula i dipl. inž. Zvonimiru Katančiću sa Zavoda za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju koji su mi pomogli oko izrade praktičnog dijela diplomskog rada.

Zahvaljujem se laborantu Božidaru Bušetinčanu iz Laboratorija za nemetale na pomoći kod ispitivanja mehaničkih svojstava.

Ksenija Gašparić



**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	VI
1. UVOD .....	1
2. KOMPOZITI .....	3
2.1. Kompoziti s prirodnim vlaknima .....	4
2.2. Nedrva prirodna vlakna .....	9
3. DRVNO POLIMERNI KOMPOZIT .....	12
3.1. Matrica kod drvno polimernog kompozita .....	12
3.1.1. Polietilen .....	13
3.1.2. Polipropilen .....	14
3.2. Drvo kao ojačalo kod drvno polimernog kompozita .....	15
3.2.1. Svojstva drva i drvnih produkata .....	17
3.2.2. Gustoća drva i drvnih produkata .....	17
3.2.3. Upijanje vlage .....	17
3.2.4. Toplinska svojstva.....	18
3.2.5. Mehanička svojstva .....	19
3.3. Proizvodnja drvno polimernog kompozita .....	19
3.4. Prednosti i nedostaci drvno polimernog kompozita .....	21
3.5. Primjena drvno polimernog kompozita .....	22
4. IZRADA DRVNO POLIMERNOG KOMPOZITA .....	25
4.1. Dobivanje drvnog brašna od borove daske .....	25
4.2. Prosijavanje drvnog brašna .....	26
4.3. Odvaga drvnog brašna i PE za ekstrudiranje .....	27
4.4. Miješanje sastojaka .....	29
4.5. Ekstrudiranje .....	30
4.6. Usitnjavanje .....	31

---

4.7. Prešanje .....	32
5. ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA .....	36
5.1. Vlačna čvrstoća i vlačni modul .....	36
5.2. Savojna čvrstoća i savojni modul .....	39
5.3. Tvrdća .....	40
5.4. Žilavost .....	42
5.5. Temperatura postojanosti oblika .....	43
6. REZULTATI .....	45
6.1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće i modula elastičnosti .....	45
6.2. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula .....	53
6.3. Rezultati tvrdoće .....	60
6.4. Rezultati žilavosti .....	64
6.5. Rezultati ispitivanja temperature postojanosti oblika .....	66
7. ZAKLJUČAK .....	71
8. LITERATURA .....	73

## **POPIS SLIKA**

Slika 1. Prirodna vlakna biljnog i životinjskog podrijetla

Slika 2. Postupak ekstrudiranja

Slika 3. Primjena u otvorenom prostoru

Slika 4. Primjena drveno polimernog kompozita u interijeru

Slika 5. Primjena drveno polimernog kompozita u automobilske industriji

Slika 6. Primjena drveno polimernog kompozita

Slika 7. Daska bora prije brušenja

Slika 8. Strojno brušenje daske

Slika 9. Spremnik za drveno brašno

Slika 10. Drveno brašno nakon brušenja

Slika 11. Uređaj za prosijavanje Retsch AS 200

Slika 12. Sušionik

Slika 13. Irganox u granulama

Slika 14. Irganox u prahu

Slika 15. Miješalica

Slika 16. Drveno brašno, Irganox u prahu,  $\text{CaCO}_3$ , reciklirana guma

Slika 17. Ekstruder na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije

Slika 18. Postupak ekstrudiranja

Slika 19. Poluproizvod nakon ekstrudiranja tzv. „špageti“

Slika 20. Granulator

Slika 21. Preša

Slika 22. Kalup

Slika 23. Kalup ispunjen smjesom

Slika 24. Ravne ploče (gornja i donja ploča)

Slika 25. Isprešane epruvete u kalupu

Slika 26. Probne epruvete

Slika 27. Ispitna epruveta

Slika 28. Univerzalna kidalica

Slika 29. Epruvete (WPC 70/30) za ispitivanje

Slika 30. Epruveta na kidalici

Slika 31. Epruvete ( WPC 70/30) za savojno ispitivanje

- Slika 32. Epruveta na kidalici
- Slika 33. Epruvete (WPC 70/30 s dodatkom rec. gume) za ispitivanje udarne radnje loma
- Slika 34. Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma
- Slika 35. Epruvete ( WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume) za ispitivanje tvrdoće
- Slika 36. Uređaj za ispitivanje tvrdoće utiskivanjem kuglice Ø 5 mm
- Slika 37. Epruvete (WPC 60/40) za ispitivanje temperature omekšavanja
- Slika 38. Uređaj za ispitivanje temperature omekšavanja
- Slika 39. Unutrašnji dio uređaja za ispitivanje temperature omekšavanja
- Slika 44. Grafički prikaz vlačne čvrstoće ispitivanih epruveta WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 45. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 46. Grafički prikaz modula elastičnosti ispitivanih epruveta WPC sa dodatkom reciklirane gume
- Slika 47. Srednje vrijednosti modula elastičnosti WPC s dodatkom gume
- Slika 48. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 49. Modul elastičnosti za epruvete WPC i WPC s dodatkom gume
- Slika 50. Grafički prikaz savojne čvrstoće ispitivanih epruveta WPC
- Slika 51. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće WPC
- Slika 52. Savojni modul ispitivanih epruveta WPC
- Slika 53. Grafički prikaz srednje vrijednosti savojnog modula WPC
- Slika 54. Prikaz savojne čvrstoće ispitivanih epruveta za WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 55. Prikaz srednje vrijednosti savojne čvrstoće WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 56. Grafički prikaz savojnog modula ispitivanih epruveta WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 57. Srednje vrijednosti savojnog modula WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 58. Usporedba savojne čvrstoće WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 59. Usporedba savojnog modula WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 60. Vrijednosti udarne radnje loma ispitivanih epruveta WPC
- Slika 61. Srednje vrijednosti udarne radnje loma WPC
- Slika 62. Grafički prikaz udarne radnje loma WPC s dodatkom recuklirane gume
- Slika 63. Srednje vrijednosti udarne radnje loma WPC s dodatkom reciklirane gume
- Slika 64. Usporedba srednje vrijednosti udarne radnje loma WPC i WPC s dodatkom gume
- Slika 65. Grafički prikaz tvrdoće WPC



Slika 66. Prikaz tvrdoće WPC s dodatkom reciklirane gume

Slika 67. Usporedba tvrdoće WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume

Slika 68. Temperatura omekšavanja ispitivanih epruveta WPC

Slika 69. Srednja temperatura omekšavanja WPC

Slika 70. Prikaz temperature omekšavanja za ispitivan epruvete WPC s dodatkom reciklirane gume

Slika 71. Srednje vrijednosti temperature omekšavanja WPC s dodatkom reciklirane gume u ovisnosti o udjelu brašna

Slika 72. Grafički prikaz usporedbe temperature omekšavanja WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovna podjela kompozita

Tablica 2. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana

Tablica 3. Svojstva prirodnih biljnih vlakana

Tablica 4. Usporedba svojstava prirodnih i staklenih vlakana

Tablica 5. Vrijednosti vlačne čvrstoće prirodnih vlakana

Tablica 6. Izvori prirodnih vlakana

Tablica 7. Kemijski sastav organskih vlakana

Tablica 8. Gustoća osnovnih vrsta polietilena

Tablica 9. Količine sastojaka drvnog brašna, PE i reciklirane gume

Tablica 10. Količina sastojaka probnog uzorka

Tablica 11. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 70/ 30

Tablica 12. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 60/ 40

Tablica 13. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 50/ 50

Tablica 14. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 15. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 16. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 17. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 70/30

Tablica 18. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 60/40

Tablica 19. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 50/50

Tablica 20. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 21. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 22. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 23. Udarne radnje loma za WPC 70/30

Tablica 24. Udarne radnje loma za WPC 60/40

Tablica 25. Udarne radnje loma za WPC 50/50

Tablica 26. Udarne radnje loma za WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 27. Udarne radnje loma za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 28. Udarne radnje loma za WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 29. Srednje vrijednosti tvrdoće za WPC

Tablica 30. Srednje vrijednosti tvrdoće za WPC s dodatkom reciklirane gume

Tablica 31. Temperature omekšavanja za WPC 70/30

Tablica 32. Temperature omekšavanja za WPC 60/40

Tablica 33. Temperatura omekšavanja za WPC 50/50

Tablica 34. Temperatura omekšavanja za WPC70/30 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 35. Temperature omekšavanja za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

Tablica 36. Temperature omekšavanja za WPC 50/ 50 s dodatkom reciklirane gume

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha$	$10^6\text{K}^{-1}$	Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	Vlačna čvrstoća
$F_{\max}$	N	Maksimalna sila
$S_0$	$\text{mm}^2$	Ploština početnog presjeka
E	$\text{N/mm}^2$	Modul elastičnosti
$l_0$	mm	Početna mjerna duljina
$l_k$	mm	Konačna mjerna duljina
F	N	Sila
$\Delta l$	mm	Produljenje
$R_{ms}$	$\text{N/mm}^2$	Savojna čvrstoća
$E_s$	$\text{N/mm}^2$	Savojni modul elastičnosti
$\Delta f$	mm	Prirast progiba
K	$\text{J/mm}^2$	Udarna radnja loma
VST	$^{\circ}\text{C}$	Srednja vrijednost temperature omekšavanja po Vicat-u
$H_k$	$\text{N/mm}^2$	Tvrdoća

## 1. UVOD

Posljedica današnjeg načina života i razvoja civilizacije je onečišćenje okoliša zbog odlaganja velikih količina otpada koji nastaje tijekom procesa proizvodnje, te po završetku životnog vijeka. Važno je istaknuti da je danas prevladala spoznaja kako je otpad najčešće važan izvor visokovrijednih sirovina iz kojih se različitim postupcima recikliranja dobiva novi proizvod, jer otpad čine različite vrste materijala kao što su metal, polimer, drvo i drveni proizvodi. U drvnoj industriji tijekom prerade drva, ali i tijekom obrade u šumi, nastaje drveni otpad „bez tehničke vrijednosti“, koji je pogodan za recikliranje. Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost može se povezati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i korištenjem obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih vlakana u kompozitima u neprestanom rastu. Prilikom razvoja bilo koje industrijske grane potrebno je imati na umu dugoročnu dostupnost sirovina. Kako bi se osigurala trajna opskrba prirodnim vlaknima, nužno je poticati razvoj poljoprivredne proizvodnje i zdravih ekosustava. Takva poljoprivreda označava ravnotežu između očuvanja prirodnih dobara i njihova korištenja, kako na lokalnom tako i na globalnom planu. To pretpostavlja trajni uzgoj biljaka s prirodnim vlaknima, skrb o korištenju poljoprivrednih dobara i očuvanje ekosustava.

Posljednjih godina istraživanja u svijetu usmjerena su na pronalaženje novih tipova kompozita, posebno onih s prirodnim vlaknima. Cijene polimernih materijala su u porastu, a dodavanje prirodnih vlakana snižava cijenu proizvoda, u nekim slučajevima i poboljšava svojstva. Poljoprivredno uzgojene biljke kao sirovine za proizvodnju prirodnih vlakana predstavljaju izvor sirovina neovisan o naftnim derivatima, pa su osobito zanimljive zbog svoje dostupnosti, obnovljivosti i prihvatljivosti s motrišta zaštite okoliša. U polimernoj industriji uobičajeno se kao dodaci (punila i ojačavala) pretežno upotrebljavaju talk, kalcijev karbonat, tinjac, te staklena i ugljična vlakna. Međutim, posljednjih desetak godina sve se češće rabe kompoziti koji sadrže prirodna, osobito drvena vlakna.

Najveći udio u proizvodnji polimera s prirodnim vlaknima zauzima drvo. Za to postoje dva važna razloga odnosno prednosti. Prvi je razlog dostupnost drva, a drugi je što ga ima više od ostalih prirodnih sirovina koje dolaze u obzir za upotrebu u kompozitima. Drvo i drugi prirodni materijali kao ojačala kod plastomera privukli su pažnju svojom niskom cijenom i ekološkom prihvatljivošću. Daljnji razvoj tih materijala i širenje njihova tržišta ovisit će o istraživanjima i poboljšanju njihovih preradbenih i uporabnih svojstava.

Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju jer svaka od njih ima određene prednosti. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu.

Polimerni otpad, jednako kao i drveni otpad, visoko je vrijedna sirovina za recikliranje. Jedan od pogodnih načina recikliranja jest proizvodnja drveno polimernih kompozita (WPC).

Svjetska potražnja za obnovljivim prirodnim materijalima posljednjih godina potaknula je istraživanja i razvoj polimernih kompozita s prirodnim vlaknima kao što su drveno polimerni kompoziti (WPC). Drveno polimerni kompoziti primjenjuju se u izradi podova, ograda, prozora, vrata, namještaja, automobilskih komponenti te brodskih oplata.

Cilj ovog rada bio je istražiti utjecaj sastava materijala na mehanička i toplinska svojstva drveno polimernih kompozita na bazi polietilena visoke gustoće (HDPE). Pripremljene su dvije grupe uzoraka, jedna bez i jedna s recikliranom gumom. Prva grupa se sastojala od HDPE i drvnog brašna u omjeru 70:30, 60:40 i 50:50 dok je druga grupa imala još dodano 5% mljevene reciklirane gume. Uzorcima su određena mehanička svojstva (vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, savojna čvrstoća i savojni modul, tvrdoća, žilavost) te temperatura omekšavanja po Vicatu.

## 2. KOMPOZITI

Kompoziti su dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Polazni materijali imaju međusobno različita svojstva a njihov spoj daje potpuno nov materijal. On ima jedinstvena, sasvim nova i drugačija svojstva u odnosu na sastavne komponente. Cilj je poboljšati strukturne, toplinske, kemijske ili neke druge karakteristike pojedinačnih materijala. Komponente se međusobno ne miješaju niti rastvaraju tako da se unutar kompozita jasno razlikuju dvije ili više faza. Jedna faza koja je nazvana ojačalom, daje čvrstoću i tvrdoću a druga faza je matrica ili vezivo i ona okružuje i drži zajedno grupe vlakana ili fragmente ojačala. Sve kompozite karakteriziraju neke zajedničke odlike koje ih čine posebnim i izdvajaju od drugih materijala kao što su čvrstoća i krutost, mala gustoća i masa, otpornost na koroziju, kemijska inertnost, mogućnost obrade i oblikovanja u raznovrsne oblike. Svojstva kompozita ovisi o vrsti materijala matrice i ojačala, veličini i raspodjeli konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, prirodi i jakosti veze među konstituentima.

Temeljna podjela kompozita prema vrsti materijala matrice [Tablica 1] :

- metalni (MMC)
- keramički (CMC)
- polimerni (PMC)

Također se kompoziti mogu podijeliti prema ojačalu [Tablica1]:

- kompoziti s česticama
- vlaknima ojačani kompoziti
- slojeviti kompoziti (laminati)
- sendvič konstrukcije

Tablica 1. Osnovna podjela kompozita [1]

KOMPOZITI			
PREMA MATRICI	PREMA OJAČALU		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- metalni</li> <li>- keramički</li> <li>- polimerni</li> </ul>	s dodatkom čestica	s dodatkom vlakana	Strukturni
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velike čestice</li> <li>- dispergirane čestice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- duga</li> <li>- kratka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- slojeviti</li> <li>- stanični</li> <li>- sendvič</li> </ul>

### 2.1. Kompoziti s prirodnim vlaknima (biokompoziti)

Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju jer svaka od njih ima određene prednosti. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu. Tablica 2 prikazuje popis važnijih biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana i grubu procjenu njihovih količina.

Tablica 2. Popis glavnih mogućih svjetskih izvora prirodnih vlakana [2]

IZVOR PRIRODNIH VLAKANA	SVIJET (tona osušene tvari)
DRVO	1750000000
SLAMA (pšenica, riža, ječam, zob, raž, lan, trava)	1145000000
STABILJKA (kukuruz, sorgum, pamuk)	970000000
ŠEĆERNA TRSKA	75000000
TRSKA	30000000
BAMBUS	30000000
SORTIRANI PAMUK	15000000
SRČIKA (juta, kenaf, konoplja)	8000000
PAPIRUS	5000000
LIKO (juta, kenaf, konoplja)	2900000
PAMUK PROČIŠĆEN	1000000
ESPARTO TRAVA	500000
LIST(američka agava, manila)	480000
SABAI TRAVA	200000
<b>UKUPNO</b>	<b>4033080000</b>

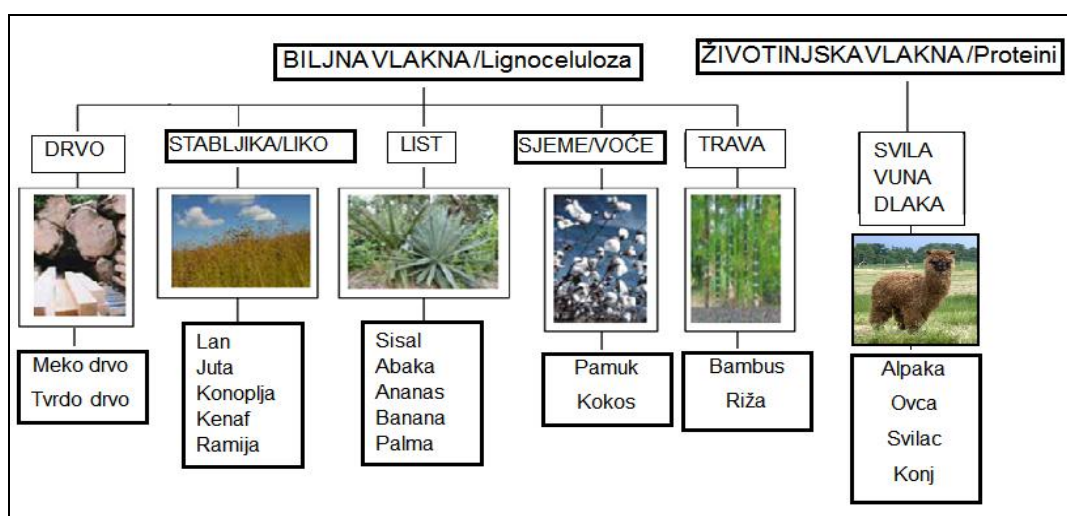


Kompozite s prirodnim vlaknima nazivamo još i biokompozitima. Biokompozite možemo definirati kao kompozitne materijale načinjene od [3]:

- prirodnih vlakana (biljnog ili životinjskog podrijetla) [Slika 1] i biološki nerazgradivih polimera nastalih derivacijama nafte (duromera - npr. epoksidna smola, fenolna smola i plastomera: PE, PP, PVC, PS).
- sintetskih (umjetnih) vlakana i biopolimera (nastalih preradom biljaka)
- od prirodnih vlakana i biopolimera koje su ujedno najekološkiji kompoziti i često se nazivaju zeleni kompoziti.

Prirodna vlakna mogu biti:

- Biljnog podrijetla:
  - ❖ vlakna (drva, trave, slame itd.)
  - ❖ lišće
  - ❖ sjeme
  - ❖ voće
  - ❖ liko
- Životinjskog podrijetla:
  - ❖ vuna
  - ❖ dlaka
  - ❖ Svila



Slika 1. Prirodna vlakna biljnog i životinjskog podrijetla [3]

Dok se drveno brašno i vlakna dobivena iz drva upotrebljavaju kao jeftina zamjena za mineralna punila i ojačala u polietilenu, poli(vinil-kloridu) i polipropilenu, ili za poboljšanje svojstava oporabljenih plastomera, vlakna dobivena iz biljaka kao što su lan, konoplja ili juta trenutno su konkurencija staklenim vlaknima u kompozitima zbog svoje ekološke prihvatljivosti i povoljne cijene.

Prirodna vlakna imaju niz prednosti:

- dobivaju se iz obnovljivih izvora
- niske su gustoće
- nisu abrazivna
- lako se oporabljaju
- biorazgradiva su
- lako su dostupna u velikim količinama
- imaju dobra akustična i izolacijska svojstva
- mali je utrošak energije potreban za preradbu
- niska cijena

Kompoziti s prirodnim vlaknima odnosno biokompoziti imaju i neke nedostatke:

- teško raspršljivi u matrici
- prirodna vlakna su higroskopna-upijaju vlagu, što ima za posljedicu stvaranje pora, slabljenje veza a time i lošija mehaničkih svojstva kompozita
- vlakna počinju degradirati u rasponu do 90 do 200<sup>0</sup>C, pa su temperatura obrade i izbor materijala matrice ograničeni
- osjetljiva su na truljenje/degradacije iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.)
- dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju od biljke do biljke
- sadnja biljaka za izradu ojačala smanjuje zemljišta za sadnju prehrambenih sorti

U odnosu na ostale kompozite, za primjenu kompozita s prirodnim vlaknima postoje neka ograničenja. Prvo se ograničenje odnosi na niže temperature preradbe. Granična temperatura razgradnje prirodnih vlakana kreće se oko 200<sup>0</sup>C, iako je moguće postići i više temperature, ali kroz kraće vrijeme. To je ujedno i ograničenje za izbor plastomera. Izbor je uglavnom sveden na polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (PVC), polietilen (PE) i polistiren (PS). No, treba naglasiti da ovi plastomeri čine približno 70% ukupne proizvodnje polimera, pa troše i značajne količine punila i ojačala. Drugo ograničenje je upijanje vode prirodnih vlakana, njihova higroskopnost. Upijanje vode može uzrokovati bubrenje vlakana što uzrokuje slabu dimenzijsku stabilnost [2].

Kad je vlakno omotano polimerom upijanje je vode najmanje. Nemoguće je potpuno ukloniti upijanje vode bez primjene skupe površinske zaštite kompozita, no moguće ga je smanjiti, primjerice, kemijskom promjenom hidroksilnih grupa prisutnih u vlaknu što, naravno, povišuje cijenu. Dobro prijanjanje vlakna s matricom također smanjuje upijanje vode. Ova ograničenja treba uzeti u obzir prilikom odabira i primjene ovih kompozita.

Celulozna vlakna odnosno punila mogu biti razvrstana u tri razreda, ovisno o njihovu ponašanju u polimernoj matrici [2]:

- Drvni i ostali biljni otpad ubraja se u skupinu punila koja povećavaju rastezni i savojni modul elastičnosti ali malo utječu na čvrstoću kompozita.
- Drvena vlakna i reciklirani papir imaju veći utjecaj na rast modula elastičnosti. Pritom povećavaju i čvrstoću kompozita, uz upotrebu veziva koja poboljšavaju prijenos naprezanja s matrice na vlakno.
- Prirodna vlakna od biljaka (kenaf, juta, lan i sl.) vrlo su učinkoviti dodaci. Rastezni i savojni modul elastičnosti je kod tih kompozita značajno viši nego kod kompozita s drvnim vlaknima, osobito ako se uzme u obzir omjer povišenja modula elastičnosti i gustoće kompozita. Taj je omjer u razini s kompozitima ojačanima staklenim vlaknima.

U tablici 3 prikazana su svojstva prirodnih biljnih vlakana kao što su gustoća, duljina, promjer i vlačna čvrstoća.

Tablica 4 prikazuje usporedbu svojstava prirodnih vlakana u odnosu na staklena vlakna a vrijednosti vlačne čvrstoće prirodnih vlakana prikazane su u tablici 5.

Tablica 3. Svojstva prirodnih biljnih vlakana [4]

MATERIJAL VLAKNA	GUSTOĆA, g/cm <sup>3</sup>		DULJINA, L (mm)		PROMJER, D (mm)		L/D	VLAČNA ČVRSTOĆA (N/mm <sup>2</sup> )
	Vlakno	Snop	Raspon	Sr. vrijed.	Raspon	Sr.vrijed.		
LAN	1,51	1,2	10-65	32	10-25	18	1,778	357
KENAF (list)	-	1,2	1,4-5	2,6	15-23	21	124	406
KENAF (srčika)	0,31	-	0,4-1,1	0,6	18-37	30	20	-
KONOPLJA	1,48	1,2	7-5,5	25	13-30	18	1,087	826
BOR	0,51	-	2,7-4,6	3,7	32-43	38	97	81,2
JELA	0,48	-	2,7-4,6	3,7	32-43	38	97	109,2
JASIKA	0,39	-	0,7-1,6	1,2	20-30	25	48	51,8

Tablica 4. Usporedba svojstava prirodnih i staklenih vlakana [4]

SVOJSTVO	PRIRODNA VLAKNA	STAKLENA VLAKNA
GUSTOĆA	niska	dvostruka od prirodnih
CIJENA	niska	niska, ali viša od prirodnih
OBNOVLJIVOST	da	ne
RECIKLIČNOST	da	ne
UTROŠAK ENERGIJE	niski	visoki
RASPROSTRANJENOST	široka	široka
CO <sub>2</sub> NEUTRALNA	da	ne
ABRAZIVNOST	ne	ne
ODLAGANJE	biorazgradljivo	nije biorazgradljivo

Tablica 5. Vrijednosti vlačne čvrstoće prirodnih vlakana [2]

VLAKNA	VLAČNA ČVRSTOĆA , GPa
KENAF	11, 91
KONOPLJA	8, 95
DRVO	7,48
AGAVA	6,14
PAMUK	3,54

## 2.2. Nedrvna prirodna vlakna

Osim drvnih produkata za dobivanje biokompozita mogu se koristiti i nedrvni lignocelulozni materijali višegodišnjih poljoprivrednih biljaka koji sadržavaju vlakna. Njihova vlakanca pokazuju tendenciju stvaranja nepovoljnih agregata tijekom prerade (grušanje), slabo su termički stabilna, slabo otporna na utjecaj vlage i vode. Izrazita higroskopnost takvih vlakanaca uzrokuje bubrenje, a samim time i stvaranje šupljina u strukturi kompozita, što u konačnici rezultira slabljenjem mehaničkih svojstava i smanjenjem dimenzijske stabilnosti kompozita. Obrada takvih vlakanaca hidrofobnim kemikalijama ili njihova modifikacija vinilnim monomerima omogućuje djelomično reduciranje higroskopnosti.

Neke studije pokazale su da biokompozit proizveden primjenom pojedinih vrsta nedrvnih lignoceluloznih punila imaju dosta neujednačena mehanička svojstva, posebice ako su kompoziti izloženi diferencijalnim klimatskim uvjetima. No valja napomenuti da je rastezni i savojni modul kompozita izrađenih primjenom kenafa ili konoplje kao ojačala znatno viši nego u kompozita s drvnim vlaknima kao punilom. Razlog tome je činjenica što je vlačna čvrstoća takvih vlakana najčešće veća od čvrstoće drvnih vlakanaca [5].

Duga prirodna vlakna možemo smatrati kompozitima šupljih celuloznih fibrila povezanih ligninom i hemiceluloznom matricom. Iako je drvo bez sumnje najveći izvor vlakana, osim iz drva, vlakna se mogu dobiti preradom odrvenjelih jednogodišnjih i višegodišnjih biljaka, palmi, raznih vrsta trava i dijelova žitarica [tablica 6].

Tablica 6. Izvori prirodnih vlakana [5]

IZVOR VLAKANA	VRSTA	PODRIJETLO
<b>ABAKA</b>	Musa textilis	list
<b>KOKOS</b>	Cocos nucifera	plod
<b>PAMUK</b>	Gossypium sp.	sjeme
<b>LAN</b>	Linum usitatissimum	stabljika
<b>KONOPLJA</b>	Cannabis sativa	stabiljka
<b>JUTA</b>	Corchorus sp	stabiljka
<b>KENAF</b>	Hibiscus cannabinus	stabiljka
<b>HIBISKUS</b>	Hibiscus sabdariffa	stabiljka
<b>RAMIJA</b>	Boehmeria nivea	stabiljka
<b>SISAL</b>	Agave sisilana	list
<b>DRVO</b>	>10.000 vrsta	stablo

Osnovna razlika između tih vlakana i vlakana drva je njihov kemijski sastav. Iako su, poput drvnih, građena od tri osnovna elementa (celuloze, hemiceluloze i lignina), njihov udio je bitno drugačiji nego u cjelovitom drvu. Ta se razlika ponajprije odnosi na sadržaj lignina [tablica 7]. Vlakna s većim udjelom lignina bolje reagiraju pri kemijskoj obradi, što izravno utječe na njihovu uporabu. Nedrvna prirodna vlakna mogu biti i do 30 puta veće duljine, barem dvostruko čvršća i tri puta kruća od drvnih vlakana.

No takva su vlakna veće higroskopnosti od drvnih, termički su nestabilna i teža za preradu zbog stvaranja nepovoljnih agregata pri miješanju s polimerom [5].

Njihova najveća prednost, uz gotovo neograničen izvor, laku nabavljivost i nisku cijenu, je činjenica da uporaba tih vlakana rezultira kompozitima manje gustoće. Automobilaska industrija naveliko se koristi time, tako da su pojedine tvrtke, poput Mercedes- Benza u svoje proizvodne procese uklopili opremanje unutrašnjosti automobila drveno polimernim otprescima izrađenim od zamjenske lignocelulozne sirovine. Uporaba agrootpada (vlakana stabljika većine žitarica, ljuskica riže, kokosovih vlakana, vlakana stabljike kukuruza, ljuski kikirikija i sl.) u proizvodnji biokompozita djelomično umanjuje nedostatak drvne sirovine i otvara mogućnosti pokretanja industrije vlakana u zemljama s izuzetno malom drvnom sirovinskom bazom.

Tablica 7. Kemijski sastav organskih vlakana [5]

MATERIJAL	UDIO, %		
	Celuloza	Hemiceluloza	Lignin
ABAKA	56-63	15-17	7-9
JUTA (liko)	45-63	18-21	21-29
JUTA (srž)	41-48	18-22	21-24
KENAF (liko)	44-57	22-23	15-19
KENAF (srž)	37-49	18-24	15-21
KOKOS	~43	<1	~45
KONOPLJA	57-77	14-17	9-13
LAN	~65	~16	2,5
PAMUK	85-90	1-3	0,7-1,6
RAMIJA	87-91	5-8	~1
SISAL	47-62	21-24	7-9
SLAMA (žitarica)	~40	~28	~17
DRVO (listače)	38-49	19-26	23-30
DRVO (četinjače)	40-45	7-14	26-34

### 3. DRVNO POLIMERNI KOMPOZIT (WPC)

Drveno polimerni kompoziti (WPC) kompozitni su materijali u kojima je polimerni materijal matrica a drveni materijal punilo odnosno ojačalo. Riječ drvo u terminu drveno polimerni kompoziti odnosi se na drvo kao aproksimaciju za materijale biljnoga (organskog) podrijetla. Pritom se pod pojmom drvo najčešće smatraju drveni produkti poput drvnog brašna, piljevine ili ostaci drvenastih poljoprivrednih biljaka. No bez obzira na mogućnosti izrade kompozita iz sekundarnih lignoceluloznih materijala, drveno polimerni kompoziti se najčešće izrađuju primjenom namjenskoga ili recikliranoga cjelovitog drva listača i četinjača.

Prva generacija drvnih kompozita bila je kombinacija recikliranoga drvnoga brašna ili piljevine i veziva na bazi duromera. Ti su materijali bili sasvim dobri za nezahtjevne primjene. Nova generacija drveno polimernih kompozita, osim što se brzo razvila, dovela je do kompozita koji imaju dobra mehanička svojstva, visoku dimenzijsku stabilnost i mogu se oblikovati u složene oblike. Oni su čvrsti, stabilni i mogu se ekstrudirati ili injekcijski prešati u uskim tolerancijama.

Polimeri su materijali velikih molekularnih masa čije se molekule sastoje od uzastopno ponovljenih osnovnih jedinica (mera), a svojstva su im uvjetovana kemijskim sastavom i strukturnom građom molekula. Uz navedene osnovne komponente WPC-a, za poboljšanja njegovih svojstava i lakoće izrade kompozita dodaju im se i različiti dodaci. Najčešće upotrebljavani dodaci su usporivači gorenja, pigmenti, omekšivači, punila i dr. WPC možemo smatrati „pravim“ kompozitnim materijalom, sa svim svojstvima, nedostacima i prednostima osnovnih materijala od kojih su izrađeni. Morfologija njihove strukture ima vrlo bitnu ulogu u definiranju njihovih uporabnih svojstava. Primjerice, izvrsna otpornost polimernih materijala na djelovanje vlage i vode u usporedbi s drvom izravno je povezana s molekulskom strukturom polimera upotrebljenog za izradu kompozita i čini WPC trajnijim i atraktivnijim. Upravo su zato WPC materijali našli primjenu kao nenosivi i djelomično opterećeni dijelovi sklopova, podne i zidne obloge, vanjske fasadne obloge, elementi mostova, dijelovi za elemente interijera u avionskoj i automobilskoj industriji itd.

#### 3.1. Matrica kod drveno polimernog kompozita

Sintetski se polimerni materijali međusobno razlikuju prema kemijskom sastavu i dijele se na poliolefine, poliestere, poliamide, poliuretane, a prema strukturnoj građi makromolekule dijele se na linearne, razgranate i umrežene [5].



Također, razlikuju se prema mehaničkim svojstvima i dijele se na poliplaste (plastičnih svojstva) i elastomere (elastičnih svojstva), a poliplasti se dalje dijele na plastomere i duromere. Plastomeri su linearni i razgranati polimeri koji se mogu višestruko prerađivati u taljevini (ekstrudiranjem), bez većih posljedica na svojstva, dok se duromeri uopće ne mogu ponovno prerađivati. Za proizvodnju WPC-a gotovo se isključivo rabe plastomeri, čija je temperatura prerade do 200°C, i to najčešće polietilen, polipropilen te, u manjim količinama, polistiren, a od duromera poliesterske, epoksidne, vinil esterske, fenolne smole itd.

Navedeno temperaturno ograničenje nije apsolutno zbog (I) mogućnosti uporabe delignificirane celuloze, jer je lignin toplinski izuzetno osjetljiv dio drvene tvari, (II) modifikacije i ojačanja celuloznih vlakana mineralima i (III) zbog skraćanja vremena kontakta celuloze s rastopljenim polimerom u miješalicama i ekstruderima. Stoga se, osim navedenih polimera, za proizvodnju WPC-a mogu upotrijebiti i akrilonitril/butadien/stiren (ABS) te poliamidi (najloni).

### 3.1.1. Polietilen

Polietilen (PE) najjednostavniji je polimerni ugljikovodik, industrijski proizveden polimerizacijom etena. Općenito, to je žilav materijal, voskastog izgleda i nepotpune prozirnosti. Polietilen je po pravilu pretežno kristalasti polimer, što znači da se pri sobnoj temperaturi sastoji od dvije faze – kristalne i amorfne. Povećanjem udjela kristalne faze, odnosno stupnja kristalnosti, povećava mu se gustoća, kao i temperatura taljenja, te mu se istodobno znatno mijenjaju mehanička svojstva. Gustoća polietilena pokazatelj je odnosa kristalne i amorfne faze i neposredno određuje područje primjene pojedinih vrsta polietilena. Osnovne vrste polietilena, ovisno o granatosti makromolekula, razlikuju se po gustoći i svojstvima [tablica 8].

**Tablica 8. Gustoća osnovnih vrsta polietilena [5]**

NAZIV	KRATICA	GUSTOĆA g/cm <sup>3</sup>
<b>POLIETILEN VISOKE GUSTOĆE</b>	PE-HD	0.941- 0.960
<b>POLIETILEN SREDNJE GUSTOĆE</b>	PE-MD	0.926- 0.940
<b>POLIETILEN NISKE GUSTOĆE</b>	PE-LD	0.910-0.925
<b>LINEARNI POLIETILEN NISKE GUSTOĆE</b>	PE-LLD	0.925-0.940
<b>POLIETILEN VRLO NISKE GUSTOĆE</b>	PE-VLD	< 0.910

Općenito, polietilen visoke gustoće upotrebljava se za proizvode velike krutosti, žilavosti i visoke kemijske postojanosti, dok se polietilen niske gustoće uglavnom upotrebljava za filmove debljine 10-250  $\mu\text{m}$ , visoke savitljivosti i prozirnosti.

Smatra se da je gustoća PE 100 postotne amorfne strukture otprilike  $0,85 \text{ g/cm}^3$ , a 100 postotne kristalne strukture  $1,0 \text{ g/cm}^3$ . Stupanj kristalnosti polietilena ovisi o razgranatosti polimernog lanca i veličini molekulskih masa, za PE-HD iznosi 60-80%, a za PE-LD 40-50%. Preradivost polietilena određuje se prema masenom protoku taljevine (engl. Melt flow rate – MFR). MFR je vrijednost (u  $\text{g}/10 \text{ min}$ ) koja govori kolika masa taljevine na određenoj temperaturi i pod određenim opterećenjem prođe kroz sapnicu viskozimetra zadanog presjeka u vremenu od 10 min [5]. Maseni protok taljevine indirektna je mjera veličine molekulskih masa, pri čemu visoka vrijednost MFR-a odgovara nižim molekulskim masama, i obrnuto. Polietilen niže molekulske mase ima viši maseni protok taljevine i uglavnom se, zbog visoke tecivosti, oblikuje postupcima injekcijskog prešanja i oslojavanja. Polietilen viših molekulskih masa zbog niže se vrijednosti taljevine (MFR) uglavnom prerađuje ekstrudiranjem.

Komercijalno, za proizvodnju drveno polimernih kompozita upotrebljava se polietilen visoke gustoće (PE-HD) i polietilen niske gustoće (PE-LD). Karakteriziraju ga svojstva, kao što su žilavost, otpornost na kidanje, kiseline i alkalije, a nedostatak mu je nepotpuna prozirnost. Polietilen visoke gustoće (PE-HD) ima linearnu strukturu makromolekula, većih je molekulskih masa, sadržava velik udio kristalne faze, ima veću gustoću i talište, veće je čvrstoće i tvrdoće, no znatno je krući od PE-LD. Manja kristalnost često rezultira boljom i lakšom obradivošću te većom otpornošću površine WPC-a.

Stupanj kristalnosti i priroda kristalnih područja često ovise o brzini hlađenja izrađenog profila, što utječe na skupljanje, lomljivost i unutarnja naprezanja WPC-a, rezultat čega je osjetljivost kompozita na oksidaciju i promjene zbog toplinske ekspanzije-kontrakcije. Općenito, dodatkom drvnog punila pretežno amorfnoj strukturi polimera sprečava se slobodno gibanje velikih polimernih molekula i povećava stupanj urednosti sustava na nadmolekularnoj razini. Povećanje udjela drva u strukturi kompozita povećava temperaturu staklišta, čime se smanjuje preradivost plastomerne matrice.

### **3.1.2. Polipropilen**

Polipropilen (PP) plastomer je linearnih molekula, svojstava sličnih polietilenu. Odlikuju ga veća čvrstoća i krutost, otpornost na više temperature i veća prozirnost, vrlo visoka otpornost na kidanje, podatnost prilikom obrade i izuzetno ravna površina proizvedenih materijala.

U usporedbi s polietilenom, polipropilen je krhak, posebice na nižim temperaturama, te toliko krut da je WPC proizveden iz polipropilena gotovo nemoguće učvrstiti vijcima, već samo uz pomoć za to predviđenih spojnika. Za razliku od Sjeverne Amerike, gdje je PE primarna polimerna sirovina za proizvodnju WPC-a, u Europi se za tu namjenu upotrebljava PP [5]. Poput polietilena, i polipropilen je izrazito otporan na djelovanje vode, no podložan je djelovanju UV zraka, što uvjetuje izradu kompozita s dodatkom svjetlosnih i UV stabilizatora. Za preradu polietilena, kao i polipropilena, odnosno za pripravu WPC-a važno je svojstvo temperatura taljenja te viskoznost. Tako vrijednost masenog protoka taljevine (MFR) za polipropilen koji se najčešće upotrebljava za ekstruziju WPC-a iznosi 2-5 g/10 min [5]. Toplinska ekspanzija polietilena i polipropilena, donekle su slične, te WPC proizveden od bilo kojega od tih dvaju polimernih materijala puže, posebice u uvjetima velikih opterećenja, pri povišenim temperaturama. To negativno svojstvo djelomično se može ublažiti pravilnim izborom organskoga ili mineralnog punila, odnosno dodavanjem aditiva kompozitima.

### **3.2. Drvo kao ojačalo kod drveno polimernog kompozita**

Drvo, odnosno drveni produkti - drveno brašno, piljevina, drvena vlakna osnovne su komponente WPC materijala. Veličina i oblik drvene komponente presudno utječu na krajnja, uporabna svojstva kompozita. Iz tog razloga razvijeno je niz metoda pripreme drvnog materijala za WPC. Drvena vlakna dobivaju se različitim metodama koje najčešće obuhvaćaju neku vrstu mehaničkoga ili kemijskog razdvajanja cjelovitog drva. Naravno, takvi postupci pripreme drvnog materijala izravno mijenjaju njegova svojstva, a samim time mijenjaju se i svojstva gotovog WPC-a. Drvena vlakna dobro su punilo za WPC zbog velikog omjera njihova promjera i duljine zbog kojega imaju visoku čvrstoću i mogućnost dobrog prijenosa naprezanja unutar drvom ispunjene plastomerne matrice. Međutim, zbog tehnoloških problema izrade WPC-a primjenom drvnih vlakana kao punila, ta vrsta drvnog materijala relativno se rijetko upotrebljava. Osnovni nedostatak drvnih vlakana za proizvodnju WPC-a upravo je njihova duljina koja smanjuje mogućnost tečenja drvom ispunjenog polimernog materijala pri preradi.

Zbog navedenih razloga češće upotrebljavani oblik drvnog materijala jest drveno brašno. Termin drveno brašno donekle je višeznačan i odnosi se na drvo svedeno na sitne, razdvojene čestice, veličinom, izgledom i strukturom najbližnje brašnu žitarica.

Iako se prema svemu navedenome može naslutiti da drveno brašno, zbog malog omjera duljine i promjera, nije dobro punilo plastomerne matrice pri proizvodnji WPC-a, ono sasvim udovoljava namjeni.

Drveno je brašno jeftin materijal i tehnološki je proces proizvodnje kompozita primjenom brašna kao punila jednostavniji. Drveno se brašno dobiva najčešće iz piljevine, blanjevine i bruševine nastale kao nusprodukt pri obradi cjelovitog drva. Naravno, drveno se brašno može dobiti i recikliranjem uporabljenih gotovih drvnih proizvoda (telefonskih stupova, kolutova za kabele, otpadnih ploča iverica, vlaknatica i dr.). Iako ne postoji standardna metoda za proizvodnju drvnog brašna, osnovne faze njegove proizvodnje jesu (I) smanjenje dimenzija cjelovitog drva korištenjem različitih tipova mlinova te (II) klasifikacija dimenzija dobivenog brašna prosijavanjem ili zračna klasifikacija. Veličina zrnaca drvnog brašna definira se otvorom oka sita i standardizirana je odrednicama normi u različitim zemljama svijeta.

Za proizvodnju WPC-a upotrebljavaju se različite vrste drvnog brašna. Njihov izbor najčešće ovisi o regionalnoj dostupnosti sirovine za njihovu proizvodnju. Od vrsta drva za proizvodnju drvnog brašna najčešće se upotrebljavaju bor, smreka, javor i hrast, no mogu se koristiti i ostale vrste. Kod izbora vrste drva za punilo, prednost bi trebalo dati vrstama s manje akcesornih tvari (ponajprije tanina), poput jele, breze i javora. Osnovni razlog za to je činjenica da su akcesorne tvari izuzetno podložne toplinskoj degradaciji.

Prilikom proizvodnje kompozita, zbog primjene visoke temperature ( $\approx 200^{\circ}\text{C}$ ), razgrađuju se lignin i akcesorne tvari i u strukturi kompozita stvaraju se mikro šupljine. Nastale mikro šupljine smanjuju gustoću kompozita i njihova fizikalno-mehanička svojstva te su mjesto potencijalnoga biološkog napada gljiva uzročnica promjene boje i truleži. Dodatni razlog za to je činjenica što su određene akcesorne tvari lako topljive u vodi, a samim time i lako isperive, te se migracijskim i sorpcijskim procesima mogu izlučiti na površinama kompozita, na kojima nakon evaporacije ostaju tamne mrlje. Tanini su kao vodotopljivi fenolni i polifenolni spojevi posebice nepovoljni kemijski sastojci jer sa solima željeza uzrokuju pojavu izuzetno tamna obojenja na površini WPC-a. Ta je činjenica i razlog zašto pojedine vrste kompozita, posebice onih proizvedenih od hrastove drvene sirovine, potamne na mjestima pritisnutima metalnim veznim elementima (spojnicama, vijcima i čavlima). Takve se mrlje mogu odstraniti isključivo oksidacijskim procesima, odnosno uporabom sredstava za čišćenje na bazi oksalne kiseline.

### **3.2.1. Svojstva drva i drvnih produkata**

Svojstva drvnog brašna i/ili drvnih vlakana u mnogočemu su drugačija od svojstava cjelovitog drva od kojega su izrađeni. Sam postupak proizvodnje, koji se gotovo uvijek provodi pri povišenom tlaku i/ili temperaturi, mijenja kemijska svojstva površine drva, njegovu gustoću, sadržaj vode, a djelomično utječe i na higroskopnost drvene tvari. Primjerice, drvena vlakna dobivena termomehaničkim putem imaju površinu zasićenu ligninom, dok ona proizvedena kemijskim putem imaju površinu bogatu ugljikohidratima. Takve kemijske promjene izravno utječu na sposobnost povezivanja polarnog drva i nepolarnog polimera i u konačnici određuju granice uporabljivosti WPC materijala. Osim kemijskih promjena na drvo pirolitički djeluje i povišena temperatura, mijenjajući time toplinska svojstva drvnih vlakana i brašna.

### **3.2.2. Gustoća drva i drvnih produkata**

Prosječna gustoća vrsta drva koja se komercijalno upotrebljavaju za proizvodnju drvnog punila za WPC u apsolutno suhom stanju iznosi 0,32-0,72 g/cm<sup>3</sup> [5]. Naravno, gustoća izravno ovisi o sadržaju vode, koji ovisi o kombinaciji klimatskih uvjeta, vremenu sječe te vremenu i metodi skladištenja oblog drva.

Usitnjavanjem cjelovitog drva i njegovom preradom smanjuje se gustoća drvene tvari, pa ona iznosi 0,19-0,22 g/cm<sup>3</sup> [5]. Osnovi razlog tome je urušavanje stanične stjenke drva tijekom usitnjavanja, a pod utjecajem povišene temperature dolazi do evaporacije slobodne i dijela vezane vode. Poroznost strukture drva omogućuje njegovu kompresiju. Pod utjecajem visokog tlaka pri izradi WPC-a injekcijskim prešanjem ( $\approx 160$  bar), stanična se stjenka dodatno urušava, no može se i ispuniti vezivom (polimerom). Stoga se gustoća drvene tvari može i povećati, te katkad iznosi čak 1,44-1,50 g/cm<sup>3</sup>. Prednost drva, u usporedbi s anorganskim punilima, prosječne gustoće više od 2 g/cm<sup>3</sup>, je što gotovi kompoziti imaju manju masu [5]. Ta činjenica bitan je faktor primjene WPC-a, posebice u specifičnim uvjetima primjene poput automobilske industrije.

### **3.2.3. Upijanje vlage**

Higroskopnost drva problem je pri proizvodnji WPC materijala. Drveno vlakno/brašno upija vlagu prije miješanja s polimerom, a i gotovi kompoziti također upijaju vlagu iz okoline. Sasvim je pogrešno razmišljati kako je drvo u strukturi WPC-a u potpunosti zaštićeno, odnosno inkapsulirano u polimernome materijalu.

Izravna posljedica upijanja vlage jesu promjene strukture WPC-a, njegovo utezanje i bubrenje, što je posebice izraženo u kompozitu s visokim postotnim udjelom drva u strukturi. Apsorbirana vlaga i voda izravno se vežu na staničnu stjenku drva reducirajući vodikove veze te time umanjujući mehanička svojstva kompozita. Primjerice, nepotpuna inkapsulacija drvnog brašna u polipropilensku matricu kompozita s 20-postotnim i 40-postotnim dodatkom drvnog brašna izraženija je u kompozita s većim udjelom drva [5]. Stoga takvi kompoziti upijaju više vlage, što izravno narušava njihova mehanička svojstva. Način proizvodnje drvnog brašna ili vlakana uvjetuje promjene u sadržaju vode i higroskopnosti. Iako su primijećene, te promjene nisu tako velike, te je postotak vlage drvnog brašna otprilike jednak onome cjelovitog drva i najčešće iznosi 3-5%. Navedena se vlaga (voda), sušenjem mora ukloniti prije miješanja drvnog brašna s polimerom. Što je veći postotak vlage drva u početku, veća je mogućnost nastanka potencijalno opasnih spojeva, veća je poroznost, manja je gustoća materijala i veće je upijanje vlage gotovog WPC-a. Bubrenjem drva u kompozitima pucaju veze između drva i polimerne matrice, a zbog stalnog bubrenja i utezanja drva nastaju mikropukotine u graničnim slojevima ojačalo-matrica te dolazi do pucanja drvnih čestica zbog ograničenog bubrenja. Navedeno se pokušava djelomično reducirati smanjenjem udjela drvene tvari u ukupnoj masi WPC-a, posebice onoga za vanjsku primjenu. Zbog čestih cikličnih promjena temperature i vlage zraka sadržaj drvene tvari takvih kompozita ograničen je na 50-65% [5].

#### **3.2.4. Toplinska svojstva**

Toplinska svojstva drva, točnije njegova zapaljivost i gorivost, osnovni su ograničavajući činitelji njegove uporabe kao punila za WPC. Iako pirolitički procesi u drvu počinju već pri nižim temperaturama, toplinska nestabilnost drvene tvari ograničava temperaturu njegove prerade i izrade WPC-a na maksimalno 200°C. Samim time ograničen je izbor polimernog materijala na one vrste koje se mogu toplinski prerađivati i oblikovati na temperaturama nižim od 200°C.

Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja ( $\alpha$ ) za drvo iznosi [5]:

- u smjeru vlakanaca:  $2 - 4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

- u smjeru okomito na vlakanca:

radijalno:  $25-30 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

tangencijalno:  $30-45 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Koeficijent linearnoga toplinskog rastezanja komercijalnog WPC-a varira između  $2-5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . Iako se taj raspon može činiti uskim, on zapravo pokazuje da se pojedine vrste WPC-a mogu produljiti-skupiti za 250% više od drugih vrsta.

Ako uzmemo u obzir da drveno punilo u ukupnoj masi WPC-a sudjeluje s 40-80%, može se zaključiti da što je vlakno drva dulje i pravilnije orijentirano u longitudinalnom smjeru (smjeru izrade WPC-a) to je manji koeficijent linearnoga toplinskog rastezanja proizvedenog kompozita. Točnije, orijentacijom vlakana drva možemo povećati/smanjiti koeficijent ekspanzije-kontrakcije. U usporedbi s ostalim komercijalnim, mineralnim punilima čiji je koeficijent  $\alpha = 150-250 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  drvo je sasvim sigurno superioran materijal.

### 3.2.5. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva drvnih vlakana i drvnog brašna značajno se razlikuju ovisno o vrsti drva, starosti, geografskom podrijetlu i uvjetima rasta stabla, načinu proizvodnje (usitnjavanja drva) i sadržaju vode. No mehanička se svojstva drvnog punila prije svega razlikuju ovisno o dimenzijama drvnih čestica. Zbog velikog broja istraživanja i još većeg broja metoda ispitivanja mehaničkih svojstava drvnog punila prilično je teško usporediti podatke iz literature. Općenito, povećanje dimenzija čestica drvnog punila povećava iznos vlačnog modula i maksimalan iznos savojne i vlačne čvrstoće WPC-a. Savojna čvrstoća također raste s porastom dimenzija čestica drvnog punila. Savojni i vlačni modul prate vrijednosti sila i jednake su distribucije. Osim dimenzija čestica drvnog punila, na konačne iznose savojne i vlačne čvrstoće, te savojnog i vlačnog modula WPC-a, utječe i postotni udio drva u strukturi kompozita.

### 3.3. Proizvodnja drvo polimernog kompozita

Za proizvodnju plastomernih kompozita primjenjuje se ekstrudiranje, injekcijsko prešanje, kalandriranje, toplo oblikovanje i pultrudiranje. Za proizvodnju plastomernih kompozita najviše se primjenjuje ekstrudiranje, i to za razne pune i šuplje profile. Postoje razni tipovi ekstrudera za preradbu drveno plastomernih kompozita. To može biti ekstruder s jednim pužnim vijkom ili ekstruder s dva pužna vijka. Osi ekstrudera s dva pužna vijka mogu biti paralelne ili pod kutom.

U nekim postupcima primjenjuju se ekstruderi gdje je prvi ekstruder za smješavanje, a drugi za protiskivanje taljevine. Injekcijsko se prešanje primjenjuje rjeđe, i to za oblikovanje proizvoda složenijih oblika.

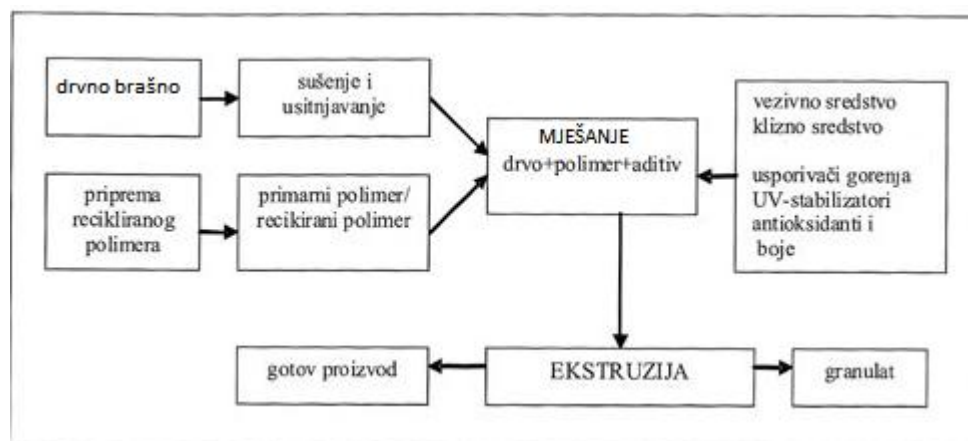


Sastojci se prvo smješavaju, a zatim se od smjese oblikuje pripremak ili konačni proizvod. Osim smješavanja u miješalici, smješavanje se može provesti ekstrudiranjem nakon čega se pravi granulat. Tako pripravljen granulat injekcijski se preša.

Prednosti ekstrudiranja u odnosu na injekcijsko prešanje su manja osjetljivost na vlažnost materijala i dobivanje gotovoga proizvoda u jednom koraku jer se smješavanje komponenata može obaviti u istom ekstruderu kojim se oblikuje profil. No to zahtijeva ekstruder s dva pužna vijka da bi se osiguralo smješavanje, a njegova cijena je viša od jednopužnoga.

Također se primjenjuje kalandriranje s toplim oblikovanjem i pultrudiranje, ali u znatno manjem opsegu. Kod kalandriranja polimer se propušta između valjaka podesivog zazora koji određuje debljinu proizvoda. Pri prolasku materijala između valjaka prisutno je miješanje materijala čime se postiže homogenost strukture materijala [6]. Kalandriranjem se najviše proizvode ploče koje se koriste za oblaganje u građevinarstvu. Pultrudiranjem se proizvode razni puni profili provlačenjem kroz matricu. Šuplji profili ograničenih duljina mogu se proizvesti namatanjem na jezgru s posmakom.

Proces proizvodnje drvo polimernog kompozita ekstrudiranjem sastoji se od slijedećih faza koje su shematski prikazane na slici 2.



Slika 2. Postupak ekstrudiranja [7]

## I. Priprema drvnog brašna

Priprema drvnog brašna sastoji se od usitnjavanja, prosijavanja i sušenja, kako bi postao pogodan za sjedinjavanje sa polimerom. Veličina čestice usitnjenog materijala nalazi se u opsegu 250-400  $\mu\text{m}$ . U zavisnosti od tehnološkog postupka koji je primijenjen, nekad sušenje prethodi usitnjavanju.



Usitnjeni materijal se ponovo suši da dostigne sadržaj vlage u opsegu 0,5–8%, s obzirom da je sadržaj od velikog značaja kako za kvalitetu, tako i za namjenu gotovog proizvoda.

## II. Miješanje sa polimerom i neophodnim aditivima

Ova faza procesa nije zastupljena u svim literaturno opisanim postupcima. Kod nekih postupaka vrši se direktno doziranje komponenata u ekstruder, bez prethodne homogenizacije. Polimer se doprema kao granulat ili kao reciklirani materijal. Najzastupljeniji su PE, PP, PVC, a u znatno manjoj mjeri PS, PU i ABS kroz postrojenja za reciklažu, oslobođena nečistoća, usitnjena i osušena dovedena u oblik koji je najpogodniji za dalju preradu.

## III. Ekstrudiranje

Za konstruktore dvopužnih ekstrudera prerada ovih kompozita bila je svojevrstan izazov. Jedan od prvih problema koji je trebalo riješiti bilo je doziranje (hranjenje ekstrudera), s obzirom na nisku nasipnu masu drvnog brašna, kao i polietilena. U zavisnosti od načina pripreme kompozita, tehnička rješenja hranjenja ekstrudera se razlikuju. Kompozit se unosi u ekstruder na različite načine: kao pojedinačne praškaste/granulirane komponente, kao praškasta mješavina polimera, drvnog brašna i aditiva i kao gotove granule kompozita.

### 3.4. Prednosti i nedostaci drvo polimernog kompozita

Drvno plastomerni kompoziti su proizvodi koji ne zahtijevaju daljnju obradu. Postojani su na vremenske uvjete, vodu i plijesan te se primjenjuju i na otvorenomu prostoru gdje bi samo drvo bilo neprikladno.

Drvno-polimerni kompoziti imaju mnogo prednosti:

- koriste jeftine i lako nabavljive sirovine
- cijenom su konkurentni i drvu i plastomerima
- lako se proizvode primjenom već postojećih tehnika proizvodnje
- proizvodi mogu biti raznoliki i veličinom i oblikom
- ne zahtijevaju površinsku zaštitu poput drva
- smanjena je cijena održavanja u odnosu na drvo
- mogu se spajati čavlima i obrađivati postupcima za obradbu drva.

Nemoguće je napraviti savršeni materijal, što se može vidjeti i po nedostacima drvno polimernog kompozita:

- imaju veću gustoću od plastomera i drva
- skuplji su od drva

- cijena montaže je veća
- za proizvodnju je potrebna veća količina energije u odnosu na drvo
- niže su čvrstoće u odnosu na drvo

Jedan od razloga razvoja drveno polimernih kompozita je ekološko motrište. Pritisci na industriju u pogledu oporablјivosti i održivoga razvoja svakodnevno rastu. Zbog toga postoji jasna potreba za produžetkom životnoga vijeka materijala kao što je drvo. Ovakvo iskorištavanje materijala, na koje se gleda kao da je otpad, daje potporu načelima održivoga razvoja.

### 3.5. Primjena drvo polimernog kompozita

Najveće i najraznovrsnije tržište ovih kompozita je građevinarstvo (66% od ukupne svjetske proizvodnje), infrastruktura (18%) i industrija transportnih sredstava (10%) [7].

Primjena u otvorenom prostoru [slika3]:

- podni profili
- zidne obloge
- profili za vrata i prozore
- ograde
- oprema za dječja igrališta
- klupe za parkove i ostala oprema
- zaštitne ograde
- stepeništa
- pješački mostovi



Slika 3. Primjena u otvorenom prostoru [7]

Primjena u interijeru [slika 4]:

- profili za podove
- pregradni zidovi
- okviri vrata
- namještaj
- oprema za skladišta
- harmonika vrata
- stepeništa



**Slika 4. Primjena drvno polimernog kompozita u interijeru [7]**

Primjena u automobilskoj industriji [slika 5]:

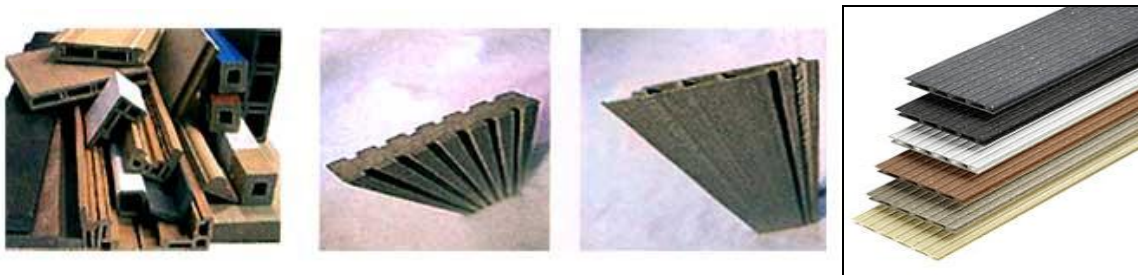
- unutrašnje obloge vrata i poklopac motora
- oslonci sjedišta
- zadnje police
- podovi za kamione i prikolice



**Slika 5. Primjena drvno polimernog kompozita u automobilskoj industriji [7]**

Primjena u javnim objektima [slika6 ]:

- pristaništa
- ograđeni prolazi
- zaštitne ograde
- zvučni zidovi na autocestama
- znaci za obilježavanje i razne table



Slika 6. Primjena drvno polimernog kompozita [7]

## 4. IZRADA DRVNO POLIMERNOG KOMPOZITA

Za izradu drvno polimernog kompozita koriste se polimerni materijali u ulozi matrice i drvni materijali kao punila odnosno ojačala. Pod pojmom drvo najčešće se smatraju drvni produkti kao što su drvno brašno, piljevina ili ostaci drvenastih poljoprivrednih biljaka. Izrada epruveta od drvno polimernog kompozita odvijala se na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, odnosno na zavodu za polimerno inženjerstvo i organsko kemijsku tehnologiju. Pripremljene su dvije grupe uzoraka, jedna bez i jedna s recikliranom gumom. Prva grupa uzoraka je sadržavala HDPE i drvno brašno u omjeru 70:30, 60:40 i 50:50 dok je druga grupa na prijedlog kolega s FKIT-a imala još dodano 5% fino mljevene reciklirane gume. Recikliranom gumom osim na trajnost utječe se i na poboljšanje mehaničkih svojstava materijala. Povećana duktilnost, otpornost na udar te dobra protuklizna svojstva.

### 4.1. Dobivanje drvnog brašna od borove daske

Kao drvno ojačalo odabrano je drvno brašno. Za izradu drvnog brašna korištena je daska bora [slika 7] koja je strojno brušena u stolarskoj radionici pomoću brusnog papira. Tijekom brušenja drvno brašno sitnih čestica ulazilo je u spremnik [slika 8, slika 9] u kojem se nakon brušenja nalazilo 3000 grama drvnog brašna.



Slika 7. Daska bora prije brušenja





**Slika 8. Strojno brušenje daske**



**Slika 9. Spremnik za drvno brašno**

#### **4.2. Prosijavanje drvnog brašna**

Nakon brušenja daske bora dobiveno je drvno brašno različitih veličina čestica [slika 10]. Za izradu epruveta od drvno polimernog kompozita potrebno je brašno veličine čestica od 50 do 100  $\mu\text{m}$ . Brašno koje je dobiveno nakon brušenja daske bilo je različitih veličina čestica te je bilo potrebno drvno brašno prosijati. Prosijavano je na uređaju za prosijavanje Retsch AS 200 [slika 11] koji se nalazi u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



**Slika 10. Drvno brašno nakon brušenja**



Slika 11. Uređaj za prosijavanje Retsch AS 200

Amplituda na uređaju za prosijavanje iznosila je 3.00 mm/g, vrijeme prosijavanja trajalo je 15 min a interval prosijavanja 30 sekundi. Uređaj Retsch AS 200 sastoji se od pet sita. Gornje sito odnosno prvo je za čestice koje su veće od 200  $\mu\text{m}$ , drugo sito za čestice veličine od 150 do 200  $\mu\text{m}$ , treće sito od 100 do 150  $\mu\text{m}$ , četvrto od 50 do 100  $\mu\text{m}$  te peto sito odnosno zadnje za čestice veličine manje od 50  $\mu\text{m}$ . Za izradu epruveta potrebno je brašno iz četvrtog sita gdje se nalazi brašno veličine čestica od 50 do 100  $\mu\text{m}$ . Uređaj radi tako da tijekom prosijavanja uslijed vibracije najveće čestice ostaju u gornjem situ a manje padaju u slijedeća sita ovisno o veličini čestica. Nakon prosijavanja dobiveno je oko 2000 grama drvnog brašna potrebne veličine čestice od 50 do 100  $\mu\text{m}$ .

#### 4.3. Odvaga drvnog brašna i PE za ekstrudiranje

Kada se završilo prosijavanje, drveno brašno potrebno je sušiti, radi što manjeg udjela vlage. Drveno brašno sušeno je 20 sati u sušioniku koji se nalazi na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije.



Slika 12. Sušionik

Kod izrade epruveta od drveno polimernog kompozita mijenjao se udio brašna, dok je veličina čestica drvnog brašna ostala jednaka. Prva izrada epruveta bila je ujedno i probna te se radilo sa 100 g sastojaka. Slijedeće epruvete rađene su sa količinom sastojaka od 200 g. U tablici 9 prikazane su količine sastojaka od 200 g, a u tablici 10 prikazane su količine sastojaka probnog uzorka od 100 g.

Tablica 9. Količine sastojaka drvnog brašna, PE i reciklirane gume

UZORCI	DRVNO BRAŠNO/g	HDPE/g	RECIKLIRANA GUMA/g
WPC 70 /30	60	140	/
WPC 60 /40	80	120	/
WPC 50 /50	100	100	/
WPC 70/ 30	57	133	10
WPC 60/ 40	76	114	10
WPC 50/ 50	95	95	10

■ WPC UZORCI

■ WPC UZORCI SA DODATKOM GUME

Tablica 10. Količina sastojaka probnog uzorka

UZORCI	DRVNO BRAŠNO /g	HDPE/g	Zn- STEARAT/g	IRGANOX/g
WPC 70/ 30	30	70	1	0.5



Kod probnog uzorka WPC 70/30 ukupne mase 100 grama dodan je stabilizator Zn- stearat 1% koji ima ulogu da nakon miješanja održi homogenu strukturu sastojaka koji se dobro ne miješaju. Također je dodan antioksidans Irganox u granulama [ slika 13] 0.5 % koji u malim koncentracijama usporava ili zaustavlja oksidacijsku razgradnju polimera. Nakon izrade probnih epruveta i nezadovoljstva dobivenim, na prijedlog kolega sa FKIT-a povećan je postotak Irganoxa i Zn stearata i još se dodao  $\text{CaCO}_3$ . Dakle ukupni udio Irganoxa koji je samljeven u prah [ slika 14 ] iznosi 2 grama, Zn- stearata 4 g te 16 g  $\text{CaCO}_3$ . U drugoj grupi uzoraka dodano je još 10 g reciklirane gume.



Slika 13. Irganox u granulama



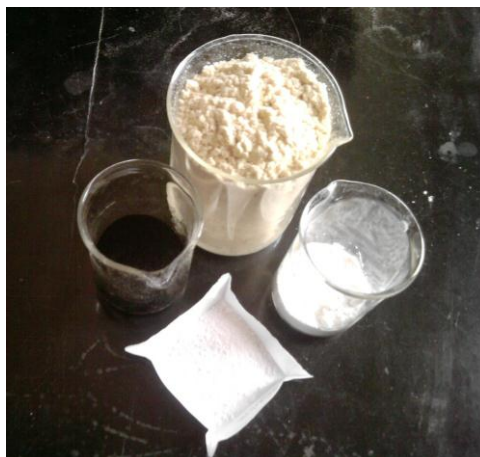
Slika 14. Irganox u prahu

#### 4.4. Miješanje sastojaka

Sastojke se mješalo u miješalici [slika 15]. Količina sastojaka od 200 g podijeljena je na pola i odvojeno se miješao HDPE sa Zn- stearatom te drveno brašno sa Irganoxom,  $\text{CaCO}_3$  i u drugoj seriji recikliranom gumom [Slika 16]. Trajanje miješanja iznosilo je 10 minuta.



Slika 15. Miješalica



**Slika 16. Drvno brašno, Irganox u prahu,  $\text{CaCO}_3$ , reciklirana guma**

#### **4.5. Ekstrudiranje**

Ekstrudiranje se provodilo u Laboratoriju za polimerno inženjerstvo Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije.

Nakon što su izvagani svi sastojci slijedeći je korak ekstrudiranje. Navedene sastojke koji su se prethodno dobro izmiješali, dozirani su u ekstruder [slika 17] sa dva pužna vijka. Ekstruder je na prijedlog kolega sa FKIT-a podešen tako da temperatura u zoni 1 iznosi  $150^\circ\text{C}$ , u zoni 2-  $160^\circ\text{C}$ , u zoni 3-  $170^\circ\text{C}$  u zoni 4 i 5-  $175^\circ\text{C}$  te na izlazu  $180^\circ\text{C}$ .



**Slika 17. Ekstruder na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Nakon što su izvagani sastojci dozirani u ekstruder dobiven je poluproizvod nakon ekstrudiranja odnosno tzv. špagete kako ih nazivaju kolege sa FKIT-a, koje se prolaskom kroz valjčiće u vodi hlade. [slika 18, slika 19].



**Slika 18. Postupak ekstrudiranja**



**Slika 19. Poluproizvod nakon ekstrudiranja tzv. „špageti“**

#### **4.6. Usitnjavanje poluproizvoda nakon ekstrudiranja**

Slijedeći korak je usitnjavanje poluproizvoda nakon ekstrudiranja odnosno usitnjavanje tzv. „špageta“ u granulatoru [slika 20], nakon čega se dobiju granule drveno polimernog kompozita. Granulator se također nalazi u prostoriji Laboratorija za polimerno inženjerstvo a radi na principu da se „špagete“ stave u otvor gdje se nalaze valjčići koji povlače tzv. „špagete“ do noža te ih on usitnjava i stvara granule. Ispod noža se nalazi otvor kroz koji izlaze granule drveno polimernog kompozita.



**Slika 20. Granulator**

Dobivene granule drveno polimernog kompozita potrebno je ponovno sušiti na 100°C , zbog prolaska kroz vodu tijekom ekstrudiranja.

#### **4.7. Prešanje**

Stavljanje dobivenih granula na prešanje je slijedeći korak u izradi epruveta. [slika 21].

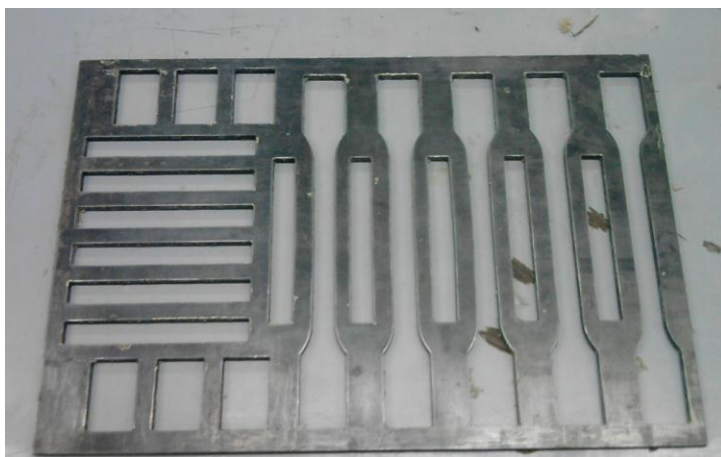


**Slika 21. Preša**

Za prešanje je potreban kalup [slika 22]. Prema zahtjevu norme EN ISO 3167 potrebna debljina epruveta je 4 mm pa je tako i debljina kalupa iznosila 4 mm. Za mehanička ispitivanja prema normi EN ISO 3167 potrebno je za svaki uzorak 20 epruveta zadanih dimenzija.

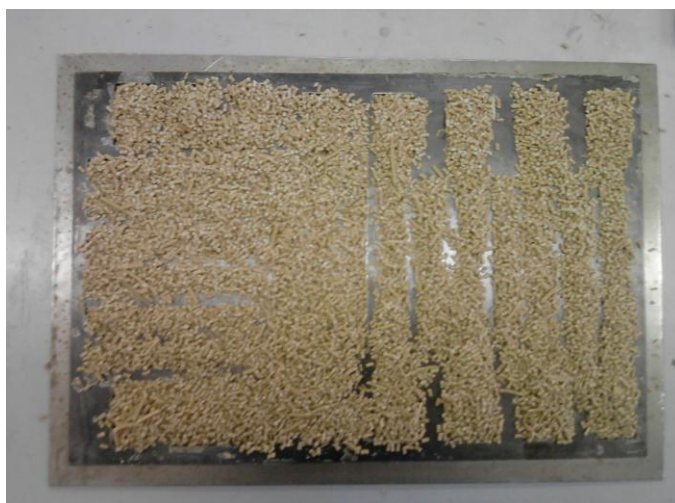


Raspored epruveta u kalupu raspoređen je tako da se dobije što više epruveta jednim prešanjem. Za svaki udio brašna bilo je potrebno isprešati jedan kalup, znači sveukupno šest kalupa (WPC 70/30, WPC 60/40, WPC 50/50, WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume, WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume, WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume).



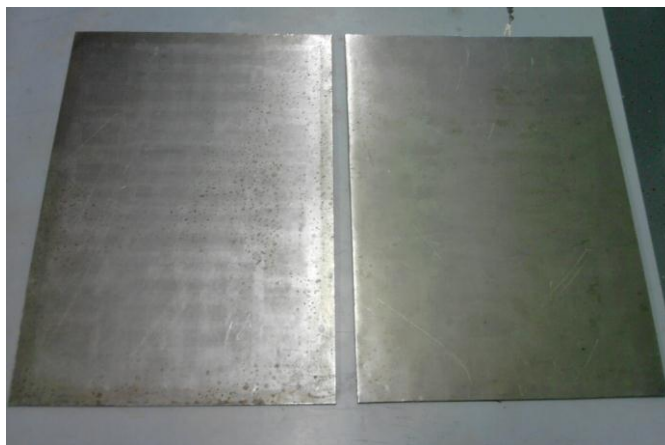
**Slika 22. Kalup**

Prvo se kalup stavi na donju ravnu ploču i ispunili se smjesom [slika 23].



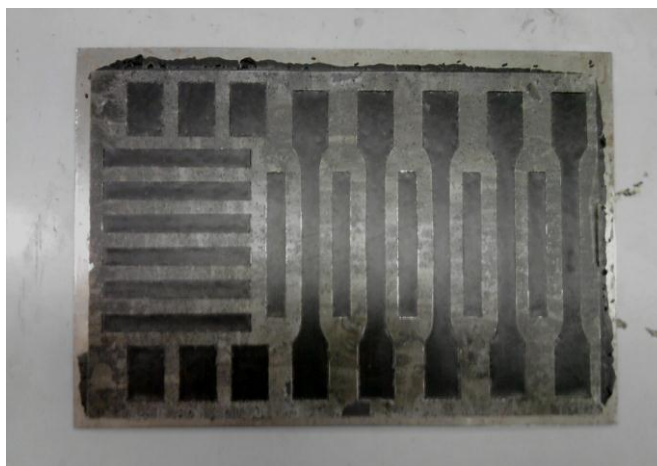
**Slika 23. Kalup ispunjen smjesom**

Nakon što se kalup ispuni smjesom stavili se gornja ploča. [slika 24]. Donja ploča drži smjesu u kalupu a gornja ploča ima ulogu da se tijekom prešanja kalup što ravnomjernije ispuni smjesom.



**Slika 24. Ravne ploče (gornja i donja ploča)**

Tako ispunjeni kalup stavlja se na prešu između dviju ploča koje su ugrijane na  $185^{\circ}\text{C}$ . Vrijeme predgrijavanja trajalo je 2 minute a vrijeme prešanja 7 minuta. Pritisak iznosi 40 000 funti na 3 i 5/8 inch dia, što je iznos u anglosaksonskoj jedinici te kada se preračuna pritisak iznosi  $27 \text{ N/mm}^2$ . Isprešane epruvete hladene su vodom. Nakon što se kalup ohladi, epruvete se uzmu iz kalupa [slika 25].



**Slika 25. Isprešane epruvete u kalupu**

Iz kalupa debljine 4 mm dobiveno je 5 velikih epruveta, 11 epruveta dimenzija 80x10 i 6 epruveta dimenzija 30x20 mm.

Nakon izrade probnog uzorka od 100 grama pojavila se šupljikavost u epruvetama [slika 26], što naravno nije poželjno. Da bi se smanjila odnosno uklonila šupljikavost prema preporuci kolega s FKIT-a promijenjeno je nekoliko parametara. Povećan je postotak Irganoxa za 0,5%, također je povećan Zn stearat za 0,5% i još je dodano 8%  $\text{CaCO}_3$ . Dok su probni uzorci hladjeni na zraku, uzorci od 200 g hlade se vodom.



**Slika 26. Probne epruvete**

## 5. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

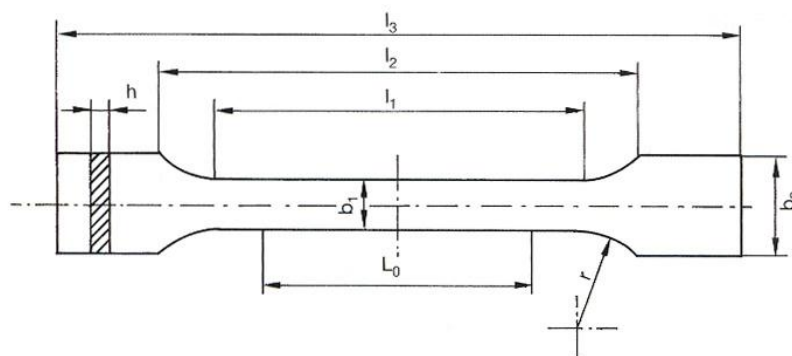
Mehanička svojstva ispitivana u ovom radu su vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti, udarna radnja loma, tvrdoća utiskivanjem kuglice te temperatura omekšavanja.

Za mehanička ispitivanja prema normi EN ISO 3167 potrebno je 20 epruveta:

- 5 velikih epruveta odnosno epruvete sa prihvatom za vlačnu čvrstoću i vlačni modul,
- 5 epruveta dimenzija 80x10 za savojnu čvrstoću i savojni modul elastičnosti,
- 5 epruveta dimenzija 80x10 za žilavost,
- 2 epruvete 30x20 za tvrdoću i
- 3 epruvete 30x20 za temperaturu postojanosti oblika.

### 5.1. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Prema normi ISO 527 za ispitivanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti potrebna je epruveta oblika prikazanog na slici 27.



Slika 27. Ispitna epruveta

Ispitna epruveta je sljedećih dimenzija:

- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| - Mjerna duljina $L_0$ | $50,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ |
| - Širina $b_2$         | $20,0 \pm 0,2 \text{ mm}$ |
| - Širina $b_1$         | $10,0 \pm 0,2 \text{ mm}$ |
| - Debljina $h$         | $4,0 \pm 0,2 \text{ mm}$  |

Statičko vlačno ispitivanje provodilo se na univerzalnoj kidalici [slika 28], gdje su epruvete učvršćene u čeljusti kidalice i polagano opterećene vlačnom silom. [slika 29, slika 30].



Na kidalici se nalaze dva mjerna uređaja na kojima se očitava produljenje epruvete sa lijeve i desne strane, također je očitana i maksimalna sila. Brzina kidanja iznosila je 7 mm/min. Na temelju tih podataka izračunata je vlačna čvrstoća odnosno naprezanje kod maksimalne sile te modul elastičnosti prema slijedećim izrazima [8]:

$$\text{- Vlačna čvrstoća: } R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2$$

$$S_0 = a \cdot b, \text{ mm}$$

gdje je:  $F_m$  – maksimalna sila, N  
 $S_0$  – ploština početnog presjeka, mm<sup>2</sup>

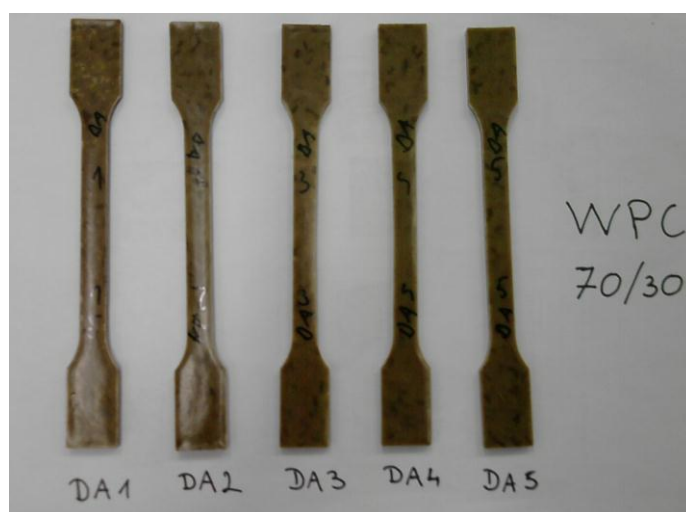
$$\text{- Modul elastičnosti: } E = \frac{l_0}{S_0} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta l}, \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta l = l_k - l_0, \text{ mm}$$

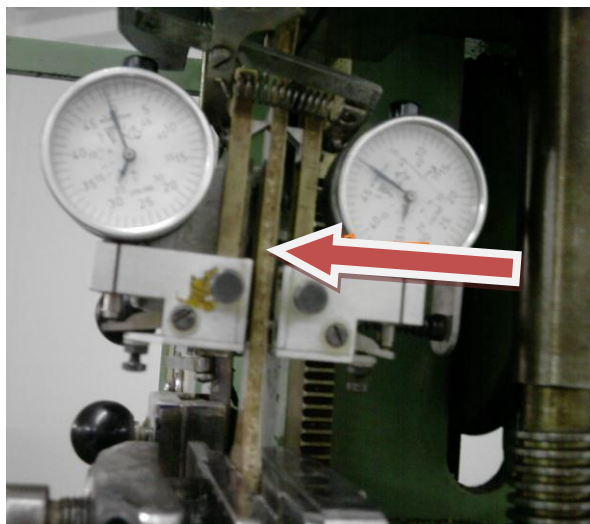
gdje je:  $l_0$  – početna mjerna duljina epruvete, mm  
 $l_k$  – konačna mjerna duljina epruvete, mm  
 $\Delta F$  – prirast sile, N  
 $\Delta l$  – produljenje, mm



Slika 28. Univerzalna kidalica



Slika 29. Epruvete (WPC 70/30) za ispitivanje

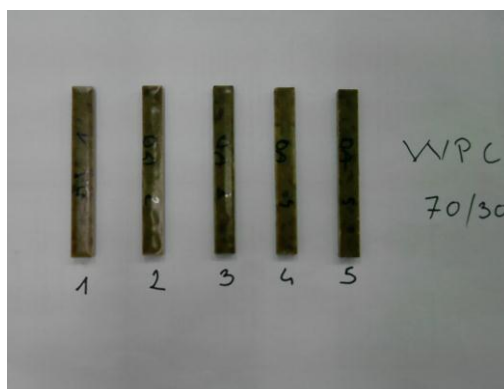


Slika 30. Epruveta na kidalici

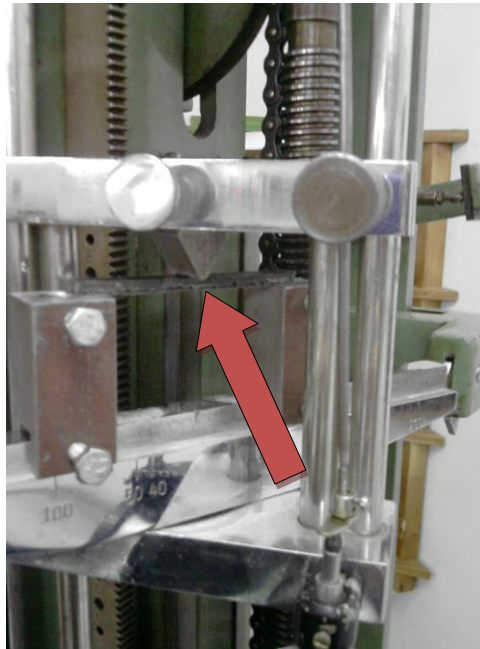
## 5.2. Savojno ispitivanje i savojni modul elastičnosti

Prema normi EN ISO 178 za ispitivanje savijanja u tri točke i savojnog modula potrebna je epruveta prikazana na slici, dimenzija 80x10x4 [Slika31].

Savojno ispitivanje se kao i vlačno ispitivalo na kidalici [slika 32]. Oblici i dimenzije epruveta mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Najčešće se primjenjuje ispitivanje trotočkastim savijanjem.



Slika 31. Epruvete ( WPC 70/30) za savojno ispitivanje



Slika 32. Epruveta na kidalici

Na kidalici je mjerni sat na kojem se očitava progib epruvete pri zadanom opterećenju. Očitana je i maksimalna sila i na temelju tih podataka računato je prema slijedećim izrazima [8]:

$$- \text{ Savojna čvrstoća: } R_{ms} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max} \cdot l}{a^2 \cdot b}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je :  $F_m$  – maksimalna sila, N

$l$  – razmak između oslonaca, mm ( $16 \cdot h_s$ )

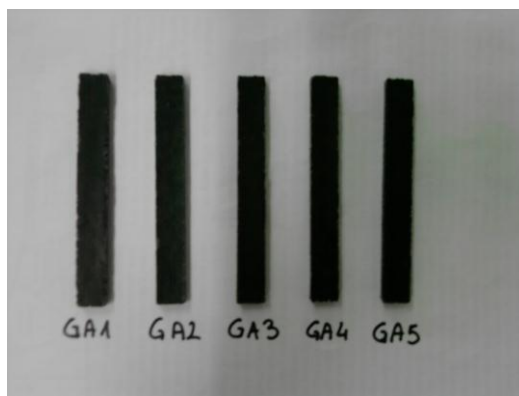
$$- \text{ Savojni modul elastičnosti: } E_s = \frac{l^3}{4a^3 \cdot b} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je :  $f$  – progib, mm

$\Delta F$  – prirast sile, N

### 5.3. Udarna radnja loma

Ispitivanjem udarne radnje loma utvrđuje se ponašanje metalnih i polimernih materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Prema normi EN ISO 179 koriste se epruvete dimenzija 80x10x4 [Slika 33].



**Slika 33. Epruvete (WPC 70/30 + sa dodatkom rec. gume)  
za ispitivanje udarne radnje loma**

Ispitivanje udarnog loma ispitnog uzorka sa zarezom po Charpyju je jedno od najstarijih mehaničkih ispitivanja materijala u eksploatacijskim uvjetima, a služi za utvrđivanje njegove otpornosti prema krhkom lomu. Na Charpyjevu batu [Slika 34] ispituje se jednim udarcem s brzinom obično 5 do 5,5 m/s ispitnog uzorka. Energija utrošena za lom ispitnog uzorka u ( $\text{J/mm}^2$ ) je mjera žilavosti materijala.

Ispitivanje udarne radnje loma provodilo se na pet epruveta zadanih dimenzija za svaki uzorak. Na mjernom satu očitana je vrijednosti i na temelju tih podataka izračunata je udarna radnja loma prema slijedećem izrazu [8].

- udarnu radnju loma :  $K = \frac{F}{a \cdot b}$ ,  $\text{J/mm}^2$



**Slika 34. Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma**

#### 5.4. Tvrdća

Ispitivanje tvrdoće je najraširenija metoda ispitivanja materijala, koja omogućava brzo, lako i jednostavno određivanje važnog mehaničkog svojstva- tvrdoće na malom uzorku praktički bez njegova razaranja. Tvrdća je otpornost ispitivanog materijala prema prodiranju u njega drugog znatno tvrdjeg tijela. Očitava se dubina prodiranja za vrijeme djelovanja opterećenja nakon 10s, 30s i 60s.

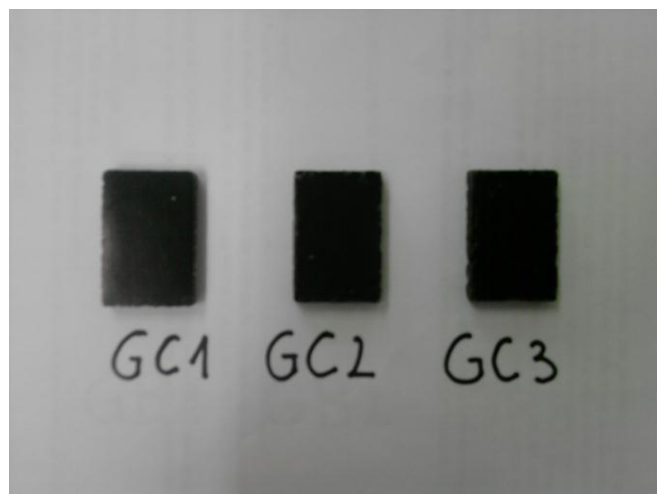
Ispitivanje tvrdoće provodilo se na dvije epruvete iz svakog uzorka. Prema normi EN ISO 2039-1 zadane dimenzije epruveta su 30x20x4 [slika 35]. Ispitivanje se provodilo utiskivanjem kuglice Ø 5 mm od kaljenog čelika [slika 36].

Tvrdća je po definiciji omjer primjenjene sile i ploštine otiska i računa se prema slijedećem izrazu [8]:

$$- \text{ tvrdoća: } H = \frac{F}{S}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je: F – sila kojom je opterećena kuglica, N

S – ploština otiska u obliku kugline kalote koji je u materijalu načinila kuglica, mm<sup>2</sup>



**Slika 35. Epruvete ( WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume)  
za ispitivanje tvrdoće**



Slika 36. Uređaj za ispitivanje tvrdoće utiskivanjem kuglice Ø 5 mm

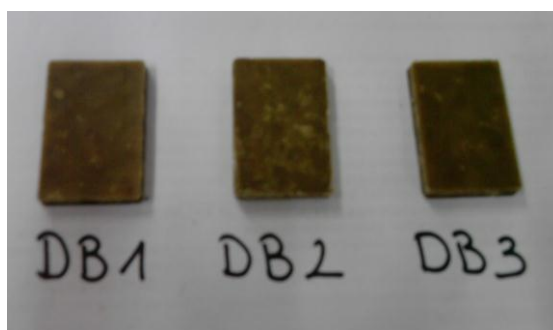
### 5.5. Temperatura omekšavanja po Vicat- u ( temperatura omekšavanja)

Ova karakteristika ukazuje na otpornost oblika polimernih izradaka na deformiranje pri povišenim temperaturama. U osnovi postoje dva pristupa: odaberu se određeni uvjeti opterećenja te se povišuje temperatura dok se ne postigne određena deformacija, ili se odabere temperatura ispitivanja i određuju deformacije do kojih dolazi u uvjetima određenih opterećenja.

Pod temperaturom omekšavanja po Vicat-u podrazumijeva se ona temperatura pri kojoj normom određeno tijelo (igla promjera 1 mm), uz djelovanje točno određene sile, proдре 1 mm okomito u epruvetu. Koristi se pretežno za plastomere.

Po normi EN ISO 306 dimenzije epruveta su 30x20x4 [slika 37]. Ispitivanje temperature omekšavanja provodilo se na tri epruvete iz svakog uzorka koje se stave u uređaj [slika 38] u kojem se nalaze dva termometra podešeni na različitim visinama radi strujanja zraka u uređaju. Na epruvete su okomito spuštene igle [slika 39] a brzina opterećivanja iznosi 50°C/min. Uređaj ima zvučni signal koji se oglasi kad igla proдре u epruvetu te se nakon zvučnog signala očitaju temperature na oba termometra.

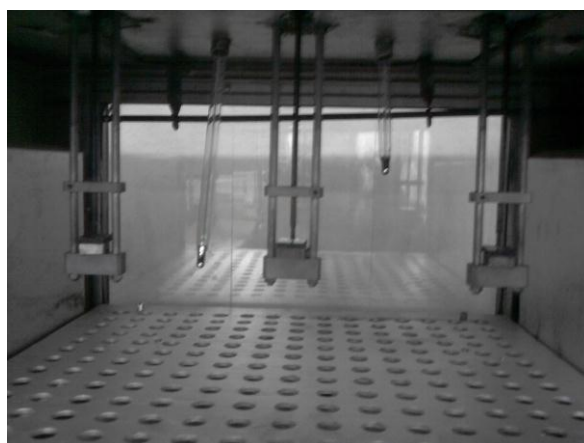




**Slika 37. Epruvete (WPC 60/40)  
za ispitivanje temperature omekšavanja**



**Slika 38. Uređaj za ispitivanje temperature omekšavanja**



**Slika 39. Unutrašnji dio uređaja za ispitivanje  
temperature omekšavanja**



## 6. REZULTATI

Tijekom ispitivanja mehaničkih svojstava bilježeni su podaci, koji su uvršteni u gore navedene izraze i dobiveni su rezultati, koji su prikazani tablično i grafički.

### 6.1. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Ispitivanje vlačne čvrstoće provodilo se na univerzalnoj kidalici proizvođača VEB Thüringer Industriewerk prema normi HRN EN ISO 527, pri brzini kidanja 7 mm/min i temperaturi ispitivanja od 20°C. U tablicama su prikazani podaci za širinu i debljinu epruveta, početna mjerna duljina epruveta, maksimalna sila te vlačna čvrstoća i modul elastičnosti koji su izračunati korištenjem tih podataka. Osim što su prikazane vrijednosti za svih pet ispitanih epruveta za svaki uzorak, prikazane su i srednje vrijednosti maksimalne sile, vlačne čvrstoće i srednje vrijednosti modula elastičnosti. Tablica 11 prikazuje vrijednosti vlačne čvrstoće za WPC 70/30 epruvete, tablica 12 za WPC 60/40 te vrijednosti vlačne čvrstoće za WPC 50/50 prikazuje tablica 13.

Tablica 11. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 70/ 30

EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	F <sub>max</sub> N	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	9,9	3,42	1043,5	50	370	1541	10,9
2	9,1	3,48	1094,9	50	512	1729	16,2
3	10	3,54	1175,9	50	516	1661	14,6
4	10,1	3,24	1308,7	50	468	2000	14,3
5	10	3,72	1292,6	50	446	1737	12,0
$\bar{X}$					462,4	1734	13,6

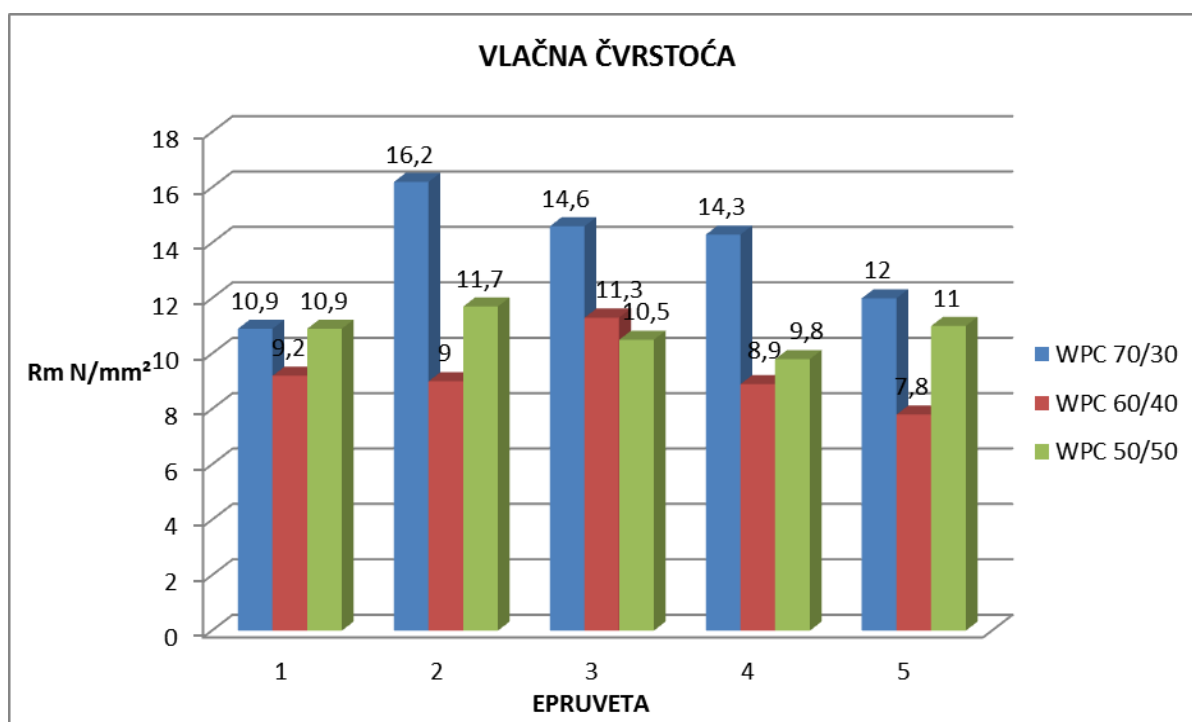
Tablica 12. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 60/ 40

EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	F <sub>max</sub> N	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	10,4	3,87	868,12	50	372	1078	9,2
2	9,7	4,06	953,79	50	354	1211	9,0
3	9	3,83	866,11	50	390	1256	11,3
4	8,8	3,86	996,68	50	304	1467	8,9
5	9,8	4,06	855,05	50	310	1075	7,8
$\bar{X}$					346	1217	9,3

Tablica 13. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 50/ 50

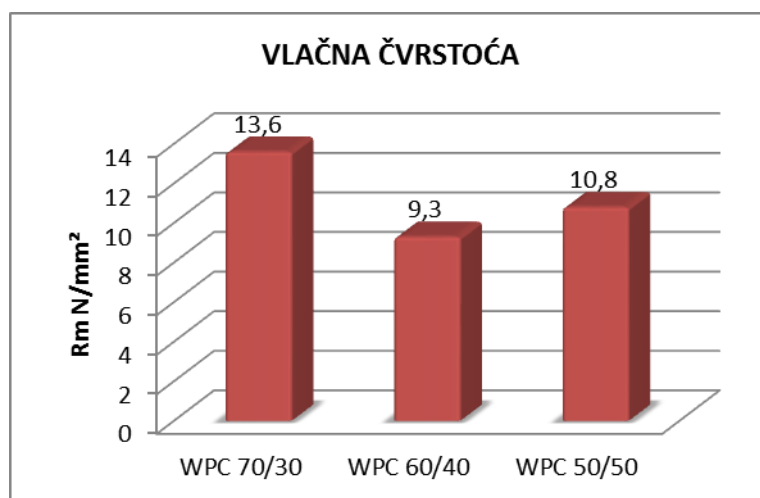
EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	Fmax N	E N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>
1	9,8	4,05	1500	50	434	1890	10,9
2	8,8	4,01	1500	50	412	2125	11,7
3	10,2	3,95	1923	50	422	2386	10,5
4	9,9	4,03	2213,1	50	390	2774	9,8
5	10,3	3,92	1833,9	50	446	2271	11,0
$\bar{x}$					420,8	2289	10,8

Dobiveni rezultati prikazani su i grafički. Vrijednosti vlačne čvrstoće za WPC epruvete prikazane su na slici 40 gdje se može vidjeti znatno odstupanje rezultata među epruvetama što bi se možda moglo pripisati šupljikavosti u pojedinim epruvetama.



Slika 40. Grafički prikaz iznosa vlačne čvrstoće ispitivanih epruveta WPC

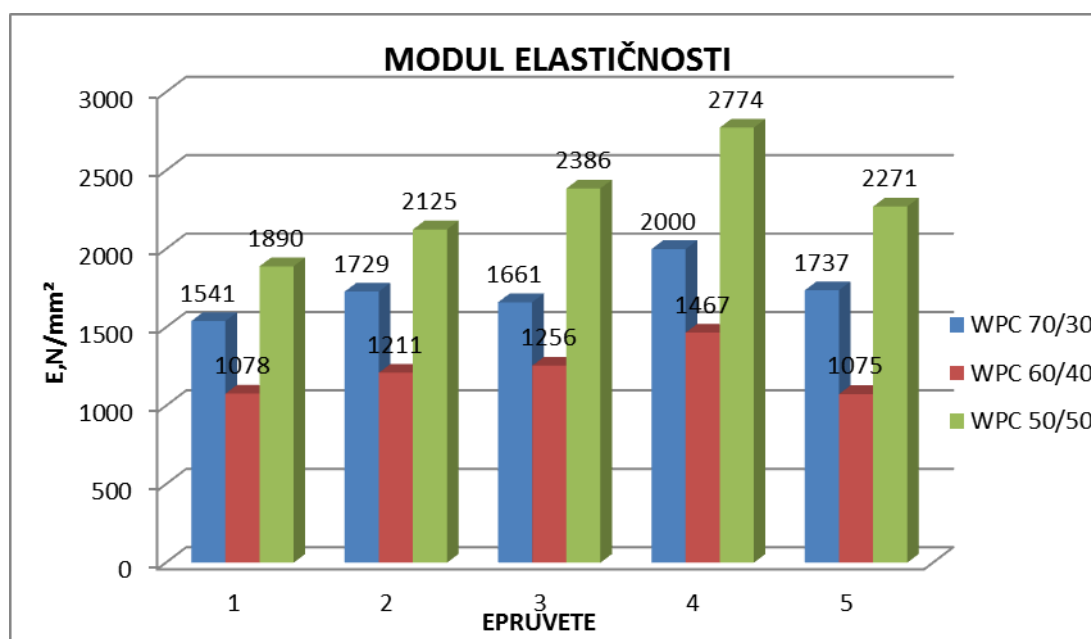
Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće također su prikazane i grafički [slika 41].



Slika 41. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće WPC

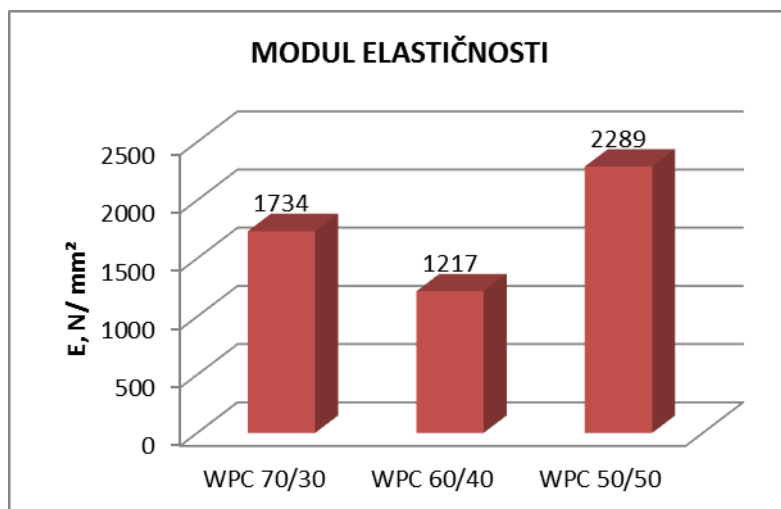
Uspoređujući rezultate srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće s obzirom na udio drva, može se primijetiti odstupanja epruvete WPC 60/40, međutim ako se uzmu u obzir podaci za WPC 70/30 i 50/50 koji su grafički prikazani na slici 41 vidi se da vlačna čvrstoća pada s porastom udjela drvnog brašna.

Kod modula elastičnosti za WPC epruvete također se pojavljuju odstupanja u rezultatima što se može primijetiti na epruveti 5 sa slike 42. Sa grafičkog prikaza također se vidi da epruvete sa 50% udjela drvnog brašna pokazuju najveći modul elastičnosti. Kod modula elastičnosti isto kao i kod vlačne čvrstoće ne postoji trend povećanja vlačne čvrstoće, kod epruveta 60/40 jasno se vidi odstupanje. Uzrok tog odstupanja mogla bi biti šupljikavost u tim epruvetama.



Slika 42. Modul elastičnosti epruveta WPC

Oslanjajući se na podatke srednjih vrijednosti modula elastičnosti za epruvete 70/30 i 50/50 [slika 43], može se zaključiti da povećanjem udjela drvnog brašna raste modul elastičnosti.



Slika 43. Srednje vrijednosti modula elastičnosti WPC

U slijedećim tablicama prikazani su podaci za WPC epruvete s dodatkom 5% reciklirane gume. Tablica 14 prikazuje rezultate ispitivanja epruveta WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume, tablica 15 prikazuje rezultate vlačne čvrstoće i modula elastičnosti za WPC 60/40 s dodatkom gume te rezultate za WPC 50/50 prikazuje tablica 16. Kao i kod vlačne čvrstoće za WPC epruvete i ovdje su prikazani podaci o epruvetama s gumom, početna mjerna duljina epruvete, maksimalna sila, vlačna čvrstoća te modul elastičnosti. U tablice su stavljene i srednje vrijednosti za čvrstoću, modul i maksimalnu silu.

Tablica 14. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume

EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	Fmax N	E N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>
1	9,6	3,9	1222,9	50	438	1633	11,7
2	9,9	3,9	1183	50	488	1532	12,6
3	10,1	3,8	1239,8	50	444	1615	11,6
4	9	3,9	933,85	50	364	1330	10,4
5	8,8	3,8	1066	50	420	1594	12,6
$\bar{X}$					430,8	1541	11,8

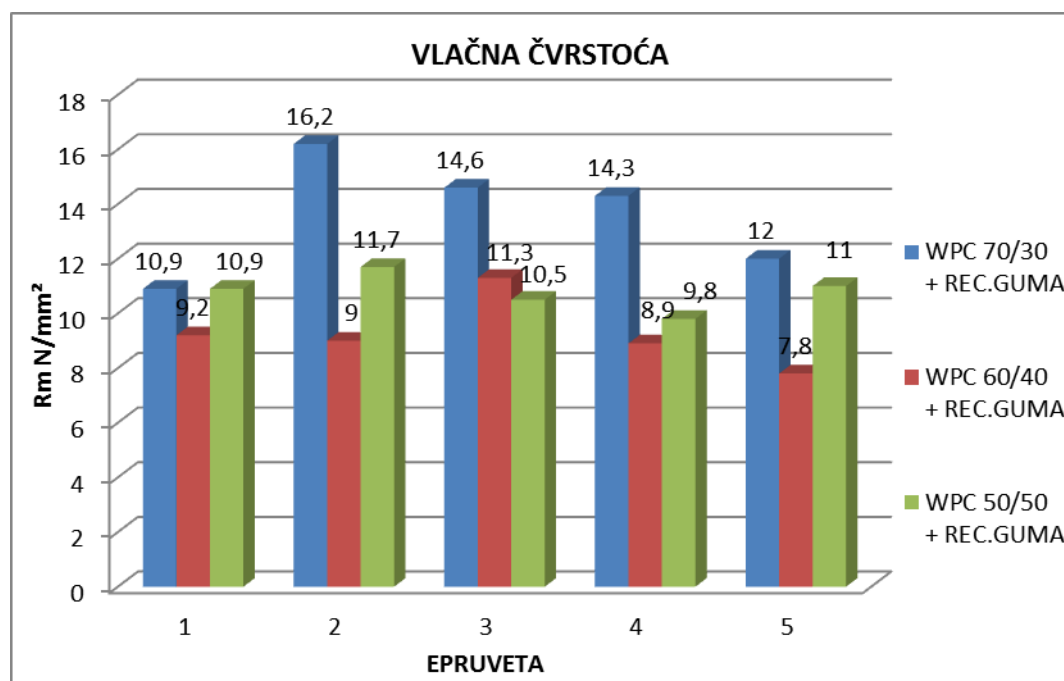
Tablica 15. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	F <sub>max</sub> N	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	8,9	3,8	1352,5	50	388	2000	11,5
2	10,2	3,8	1417	50	480	1828	12,4
3	9,17	3,8	1500	50	474	2152	13,6
4	9,9	3,9	1355,8	50	406	1756	10,5
5	8,5	3,8	1393,1	50	408	2157	12,6
$\bar{X}$					431,2	1978	12,1

Tablica 16. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume

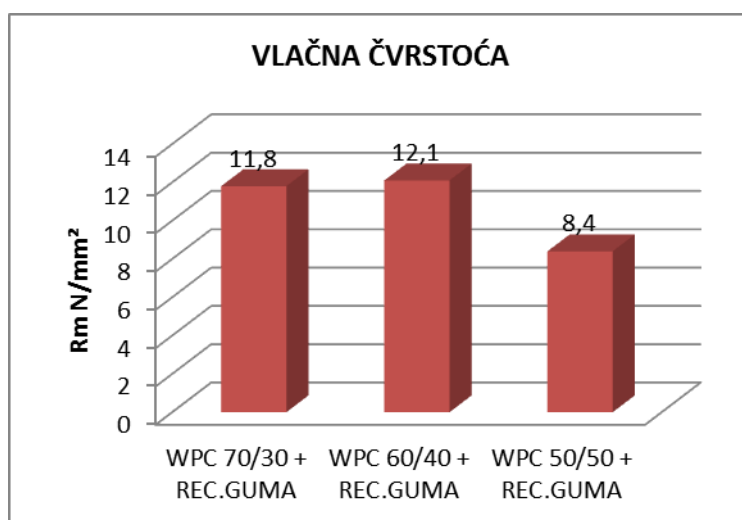
EPRUVETA	b mm	h mm	F/f	l mm	F <sub>max</sub> N	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	9,7	3,9	2072	50	332	2739	8,8
2	10,2	3,9	1500	50	332	1885	8,3
3	10,4	3,8	1500	50	270	1898	6,8
4	8,8	3,9	1867	50	360	2720	10,5
5	8,8	4	1500	50	272	2131	7,7
$\bar{X}$						2274	8,4

Dobiveni rezultati vlačne čvrstoće i modula elastičnosti ispitivanih epruveta WPC s dodatkom gume prikazani su i grafički [slika 44, slika 46], kao i srednje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti epruveta WPC s dodatkom 5% reciklirane gume [slika 45, slika 47].



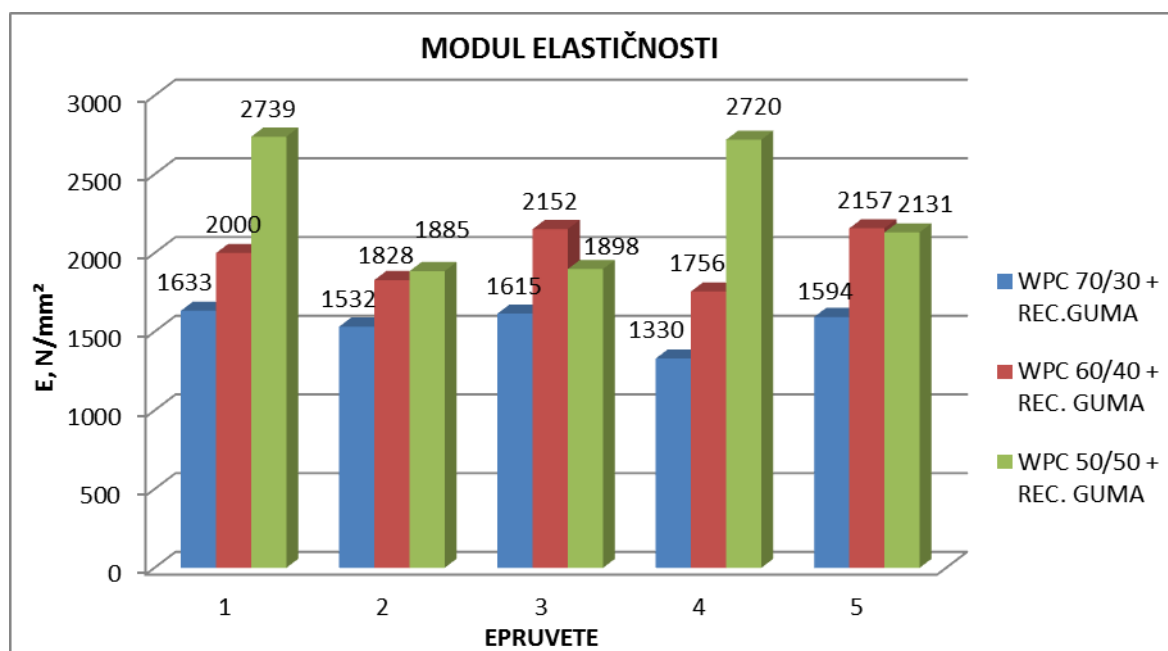
Slika 44. Grafički prikaz vlačne čvrstoće ispitivanih epruveta

Isto kao i kod WPC epruveta i ovdje su odstupanja na epruvetama sa 40% drvnog brašna. Analizirajući grafički prikaz sa slike 44, može se vidjeti da kod epruveta 3 postoji trend smanjenja vlačne čvrstoće u rezultatima dok kod ostalih epruveta nema trenda. Međutim ako uzmemo u obzir srednje vrijednosti vlačne čvrstoće za WPC 70/30 i WPC 50/50 može se zaključiti da vlačna čvrstoća kod epruveta s dodatkom gume pada s povećanjem udjela drvnog brašna

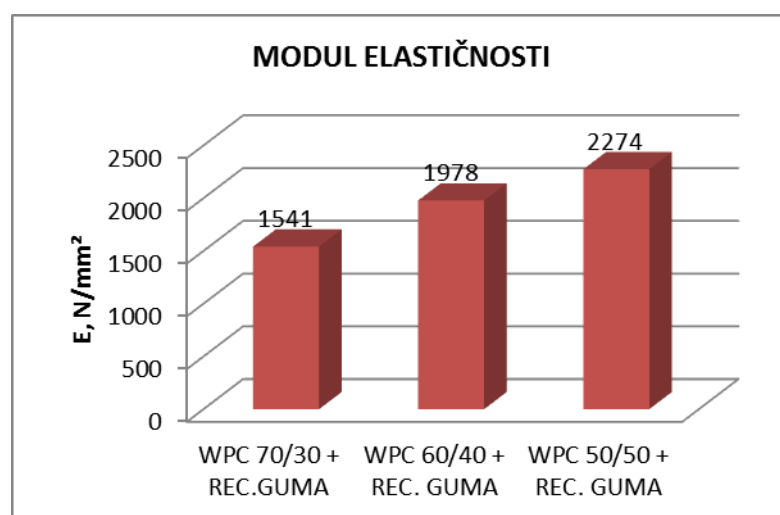


Slika 45. Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće WPC s dodatkom reciklirane gume

Kod modula elastičnosti grafički prikazanog na slici 46 može se vidjeti da kod epruveta 1, 2 i 4 postoji trend povećanja modula elastičnosti u rezultatima, dok kod ostalih epruveta nema trenda. Međutim uzimajući srednje vrijednosti modula elastičnosti kod epruveta s gumom, sa slike 47 jasno se vidi trend povećanja u rezultatima, odnosno možemo jasno zaključiti da porastom udjela drvnog brašna raste modul elastičnosti.

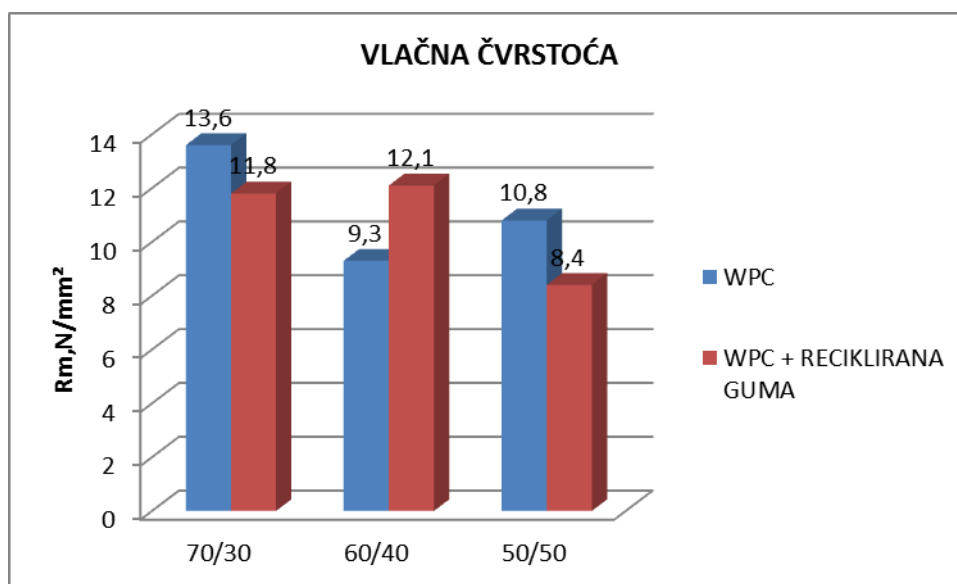


Slika 46. Grafički prikaz modula elastičnosti ispitivanih epruveta WPC s dodatkom reciklirane gume



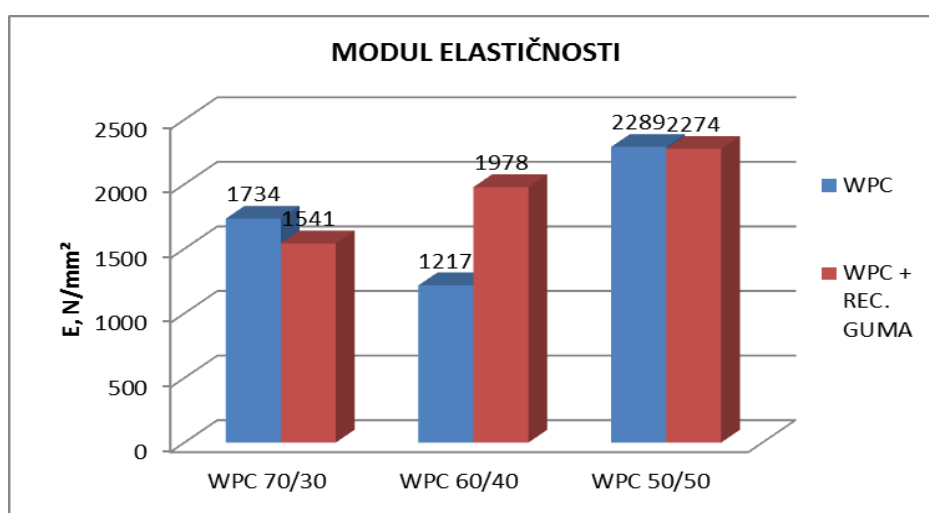
Slika 47. Srednje vrijednosti modula elastičnosti WPC sa dodatkom gume

Na slici 48 i 49 je zajednički prikaz vlačne čvrstoće i modula elastičnosti za oba uzorka. Prikazana je usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće za epruvete WPC i WPC s dodatkom gume u ovisnosti udjela drvnog brašna. Iz grafičkog prikaza na slici 48 može se vidjeti da vlačna čvrstoća pada s povećanjem udjela drvnog brašna te je vlačna čvrstoća kod epruveta bez gume veća nego kod epruveta s gumom.



**Slika 48. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume**

Kod modula elastičnosti imamo obrnutu situaciju nego kod vlačne čvrstoće. Ovdje, što možemo vidjeti sa slike 49 modul elastičnosti raste s porastom drvnog brašna. Epruvete s gumom imaju nešto manji modul elastičnosti u odnosu bez dodatka reciklirane gume.



**Slika 49. Modul elastičnosti za epruvete WPC i WPC s dodatkom gume**

## 6.2. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti

Savojna čvrstoća ispitivala se na univerzalnoj kidalici, proizvođača VEB Thüringer Industriewerk prema normi HRN EN ISO 178. Savijalo se u tri točke, razmak između oslonaca iznosio je 60 mm a temperatura ispitivanja 20°C. Tijekom ispitivanja bilježeni su podaci i uvrštavanjem u navedene izraze dobivena je savojna čvrstoća i savojni modul.



U tablicama 17, 18 i 19 prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula za WPC ovisno o udjelu drvnog brašna. U tablicama su prikazani podaci širine i debljine epruveta, razmak između oslonaca maksimalna sila te savojni modul i savojna čvrstoća, također su prikazane srednje vrijednosti za savojnu čvrstoću, savojni modul te maksimalnu silu.

**Tablica 17. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 70/30**

<b>EPRUVETA</b>	<b>h mm</b>	<b>b mm</b>	<b>F/f</b>	<b>L mm</b>	<b>E N/mm<sup>2</sup></b>	<b>R<sub>ms</sub> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>max</sub> N</b>
<b>1</b>	3,51	10	13,6	60	1698,3	33,6	46
<b>2</b>	3,32	9,9	12,3	60	1833,4	31,3	38
<b>3</b>	3,35	10	15,6	60	2240,7	27,3	34
<b>4</b>	3,41	9,9	15,3	60	2104,7	23,5	30
<b>5</b>	3,43	10	14,78	60	1977,8	27,5	36
$\bar{X}$					<b>1971,0</b>	<b>28,6</b>	<b>36,8</b>

**Tablica 18. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 60/40**

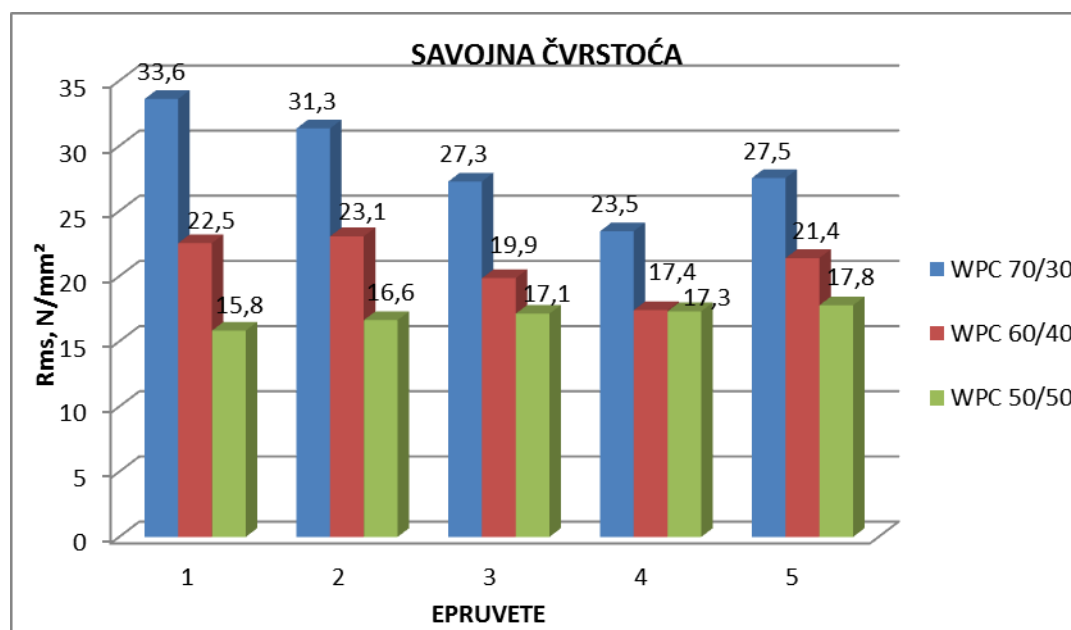
<b>EPRUVETA</b>	<b>h mm</b>	<b>b mm</b>	<b>F/f</b>	<b>L mm</b>	<b>E N/mm<sup>2</sup></b>	<b>R<sub>ms</sub> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>max</sub> N</b>
<b>1</b>	3,82	9,3	16,3	60	1697,9	22,5	34
<b>2</b>	3,87	9,9	19,6	60	1844,5	23,1	38
<b>3</b>	4,04	10	17,4	60	1424,9	19,9	36
<b>4</b>	4	9,7	18,1	60	1574,4	17,4	30
<b>5</b>	3,82	9,8	21,7	60	2145,0	21,4	34
$\bar{X}$					<b>1737,4</b>	<b>20,9</b>	<b>34,4</b>

**Tablica 19. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti za WPC 50/50**

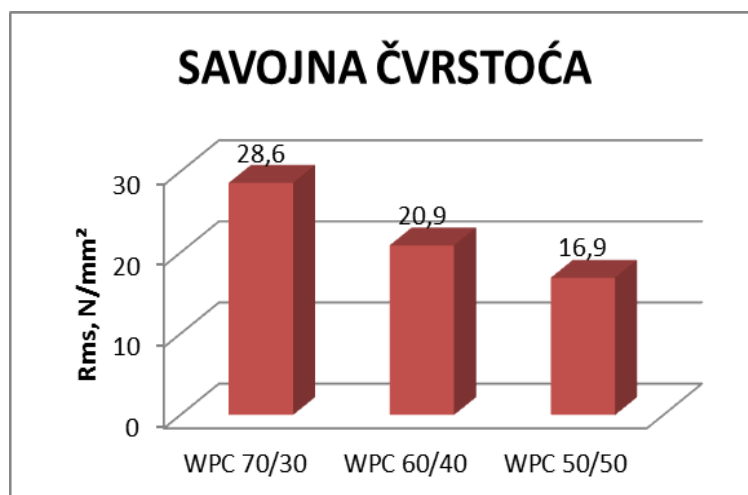
<b>EPRUVETA</b>	<b>h mm</b>	<b>b mm</b>	<b>F/f</b>	<b>L mm</b>	<b>E N/mm<sup>2</sup></b>	<b>R<sub>ms</sub> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>max</sub> N</b>
<b>1</b>	3,99	10	20,4	60	1734,2	15,8	28
<b>2</b>	4,07	9,8	19,5	60	1593,7	16,6	30
<b>3</b>	4,08	10,1	21,7	60	1708,3	17,1	32
<b>4</b>	4,12	9,8	18,1	60	1426,1	17,3	32
<b>5</b>	4,03	10,6	21,6	60	1681,2	17,8	34
$\bar{X}$					<b>1628,7</b>	<b>16,9</b>	<b>31,2</b>

Rezultate savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti koji su prikazani u tablicama prikazani su i grafički. Usporedba ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula za svih pet ispitanih WPC epruveta prikazana je na slici 50 i 52. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula epruveta WPC prikazane su na slici 51 te slici 53.

Grafičkim prikazom na slici 50, prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće za svih pet WPC epruveta. Može se primijetiti da nema odstupanja u rezultatima među epruvetama, odnosno možemo reći da postoji trend smanjenja savojne čvrstoće.



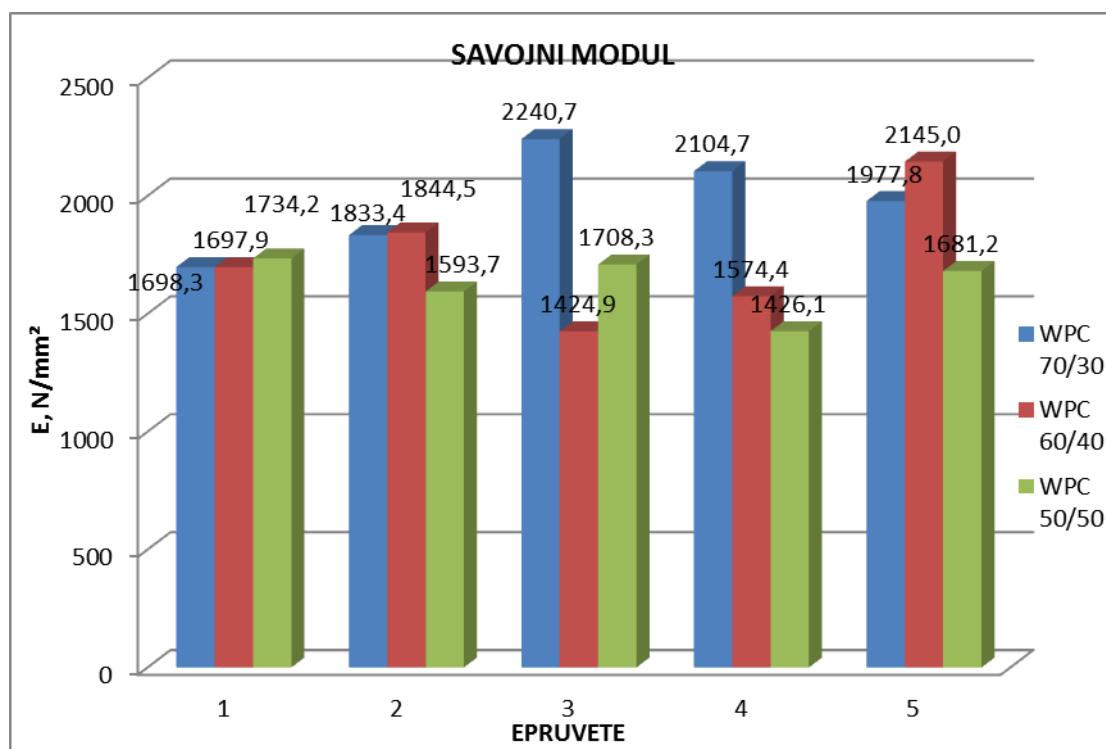
Slika 50. Dijagramski prikaz savojne čvrstoće ispitivanih epruveta WPC



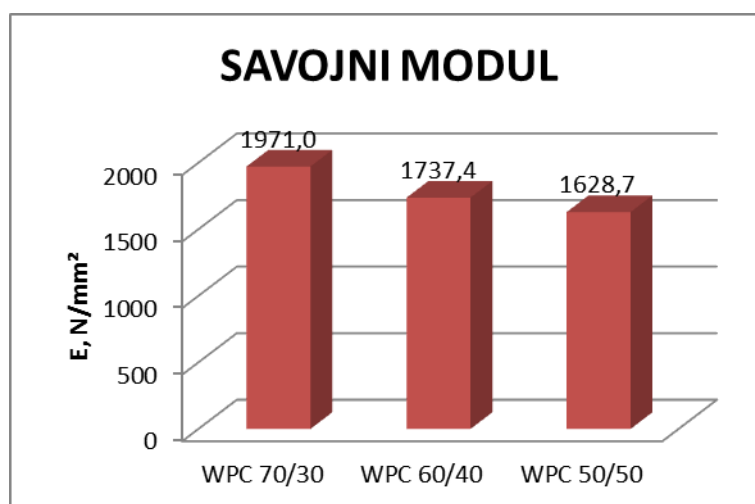
Slika 51. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće WPC

Uspoređujući srednje vrijednosti savojne čvrstoće sa slike 51 može se zaključiti da porastom udjela drvnog brašna savojna čvrstoća pada, odnosno epruveta sa 30% drvnog brašna ima najvišu savojnu čvrstoću u odnosu na ostale uzorke epruveta.

Kod savojnog modula koji je prikazan grafički za sve WPC epruvete na slici 52, primjećuje se kod epruveta 3 odstupanje u rezultatima u odnosu na ostale epruvete.



Slika 52. Savojni modul ispitivanih epruveta WPC



Slika 53. Grafički prikaz srednje vrijednosti savojnog modula WPC

Iz grafičkog prikaza srednjih vrijednosti modula elastičnosti prikazanih na slici 53, vidi se da postoji trend smanjenja savojnog modula u rezultatima i može se zaključiti da savojni modul pada s porastom drvnog brašna. Ako uspoređujemo sa vlačnim modulom elastičnosti može se primijetiti da kod vlačnog i savojnog modula je obrnuta situacija.

U tablicama 20, 21 i 22 prikazani su podaci zabilježeni tijekom ispitivanja epruveta te su prikazani rezultati savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti za WPC s dodatkom reciklirane gume.

**Tablica 20. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume**

EPRUVETA	h mm	b mm	F/f	L mm	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>ms</sub> N/mm <sup>2</sup>	F <sub>max</sub> N
1	3,7	9,7	9,9	60	1088,1	16,3	24
2	3,8	9,8	10,3	60	1034,3	20,4	32
3	3,8	9,9	13,1	60	1302,2	17,6	28
4	3,8	9,7	10,1	60	1024,7	19,3	30
5	3,6	9,9	14,9	60	1742,0	21,0	30
$\bar{X}$					1238,2	18,9	28,8

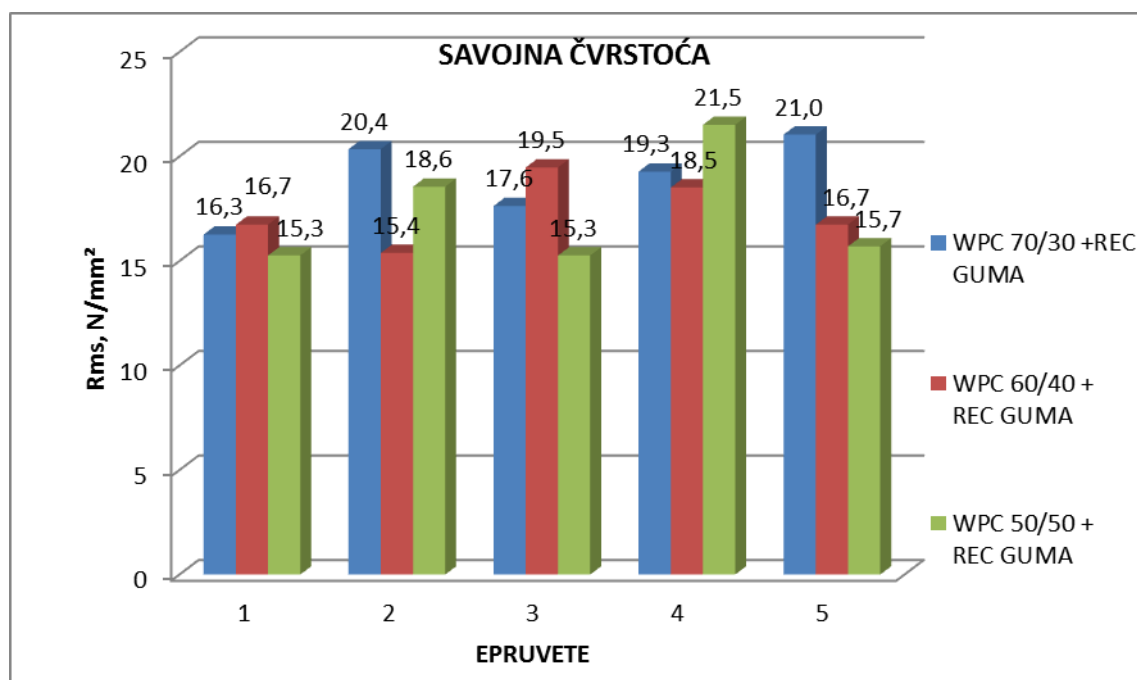
**Tablica 21. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume**

EPRUVETA	h mm	b mm	F/f	L mm	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>ms</sub> N/mm <sup>2</sup>	F <sub>max</sub> N
1	3,9	9,9	11,9	60	1094,2	16,7	28
2	3,9	10	12,4	60	1128,8	15,4	26
3	3,8	9,6	12,2	60	1250,6	19,5	30
4	3,8	10,1	13,5	60	1315,4	18,5	30
5	3,9	9,9	14,8	60	1360,9	16,7	28
$\bar{X}$					1230,0	17,4	28,4

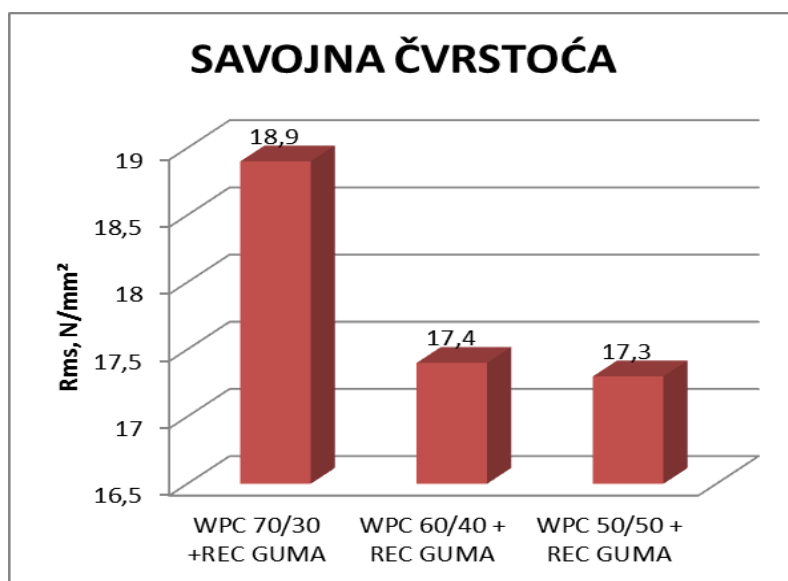
**Tablica 22. Savojna čvrstoća i savojni modul za WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume**

EPRUVETA	h mm	b mm	F/f	L mm	E N/mm <sup>2</sup>	R <sub>ms</sub> N/mm <sup>2</sup>	F <sub>max</sub> N
1	3,8	9,8	14,8	60	1486,2	15,3	24
2	4	9,7	21	60	1826,7	18,6	32
3	3,8	9,8	21,9	60	2199,2	15,3	24
4	3,9	9,9	24,8	60	2280,4	21,5	36
5	3,9	9,8	15,4	60	1430,5	15,7	26
$\bar{X}$					1844,6	17,3	28,4

Dobiveni podaci prikazani su i grafički. Slike 54 i 56 prikazuju savojnu čvrstoću i savojni modul ispitivanih epruveta za WPC s dodatkom gume. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula za WPC s dodatkom gume prikazane su na slikama 55 i 57.



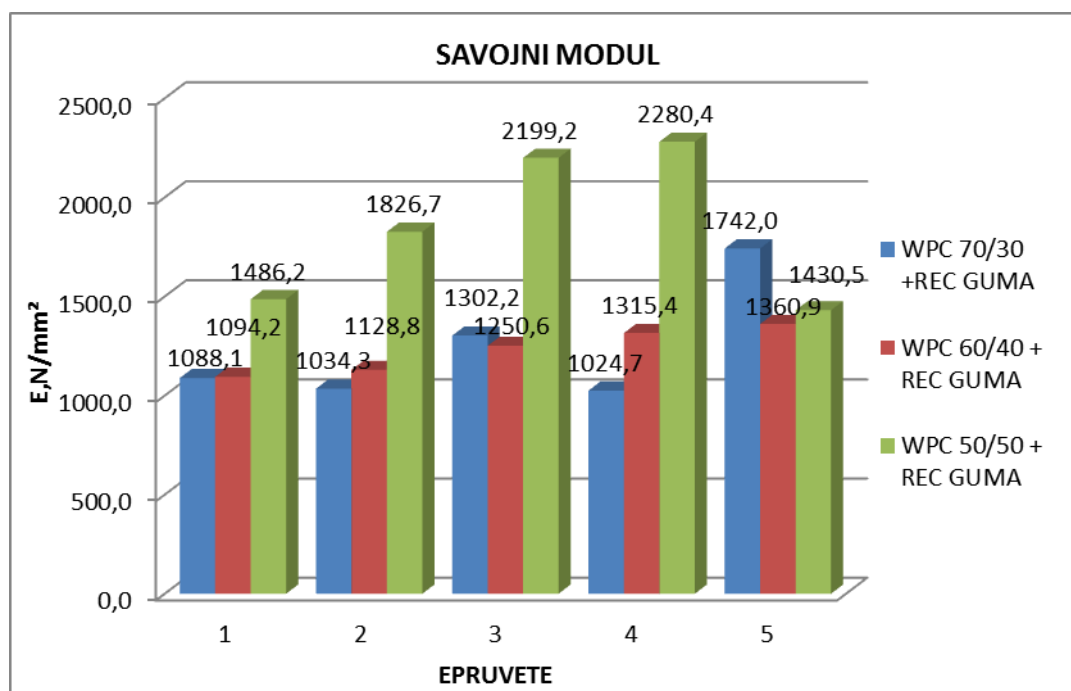
Slika 54. Prikaz savojne čvrstoće ispitivanih epruveta za WPC s dodatkom reciklirane gume



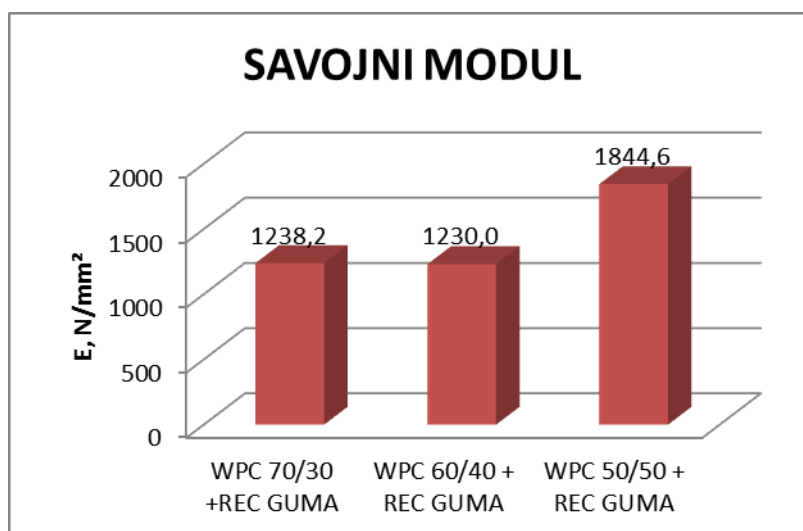
Slika 55. Prikaz srednje vrijednosti savojne čvrstoće WPC s dodatkom reciklirane gume

Savojna čvrstoća epruveta s dodatkom reciklirane gume pada sa porastom udjela drvnog brašna u epruvetama, dakle epruvete sa najmanjim udjelom brašna imaju najveću savojnu čvrstoću, što se vidi sa slike 55.

Također se može zaključiti da se savojna čvrstoća kod epruveta s gumom i bez gume odvija jednako, odnosno pada s porastom drvnog brašna. Možemo primjetiti trend smanjenja savojne čvrstoće u rezultatima.



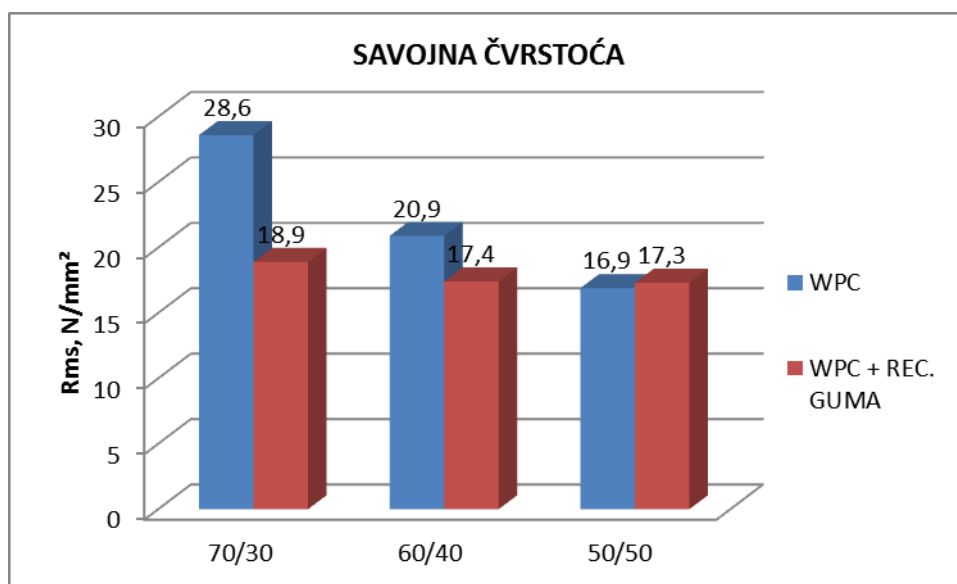
Slika 56. Grafički prikaz savojnog modula ispitivanih epruveta WPC s dodatkom reciklirane gume



Slika 57. Srednje vrijednosti savojnog modula WPC s dodatkom reciklirane gume

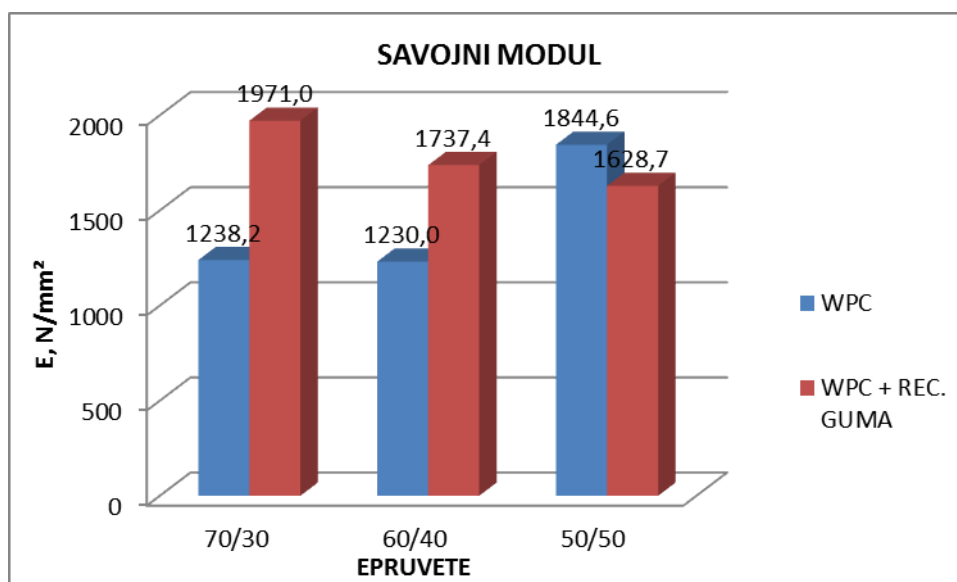
Savojni modul kod epruveta sa recikliranom gumom raste s povećanjem udjela drvnog brašna u epruvetama.

Na slici 58 i 59 grafički su uspoređene srednje vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula za WPC s dodatkom gume.



Slika 58. Usporedba savojne čvrstoće WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume

Uspoređujući rezultate savojne čvrstoće WPC epruveta i epruveta s gumom vidljivo je da se vlačna čvrstoća kod oba uzoraka jednaka, odnosno s povećanjem udjela drvnog brašna pada savojna čvrstoća. Sa grafičkog prikaza na slici 58 također se može vidjeti da epruvete s dodatkom reciklirane gume imaju nešto manju savojnu čvrstoću.



Slika 59. Usporedba savojnog modula WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume

Analizirajući grafikon na slici 59 primjećuje se da savojni modul kod epruvete bez gume raste s povećanjem udjela drvnog brašna a kod epruveta s gumom imamo obrnutu situaciju odnosno savojni modul pada s povećanjem drvnog brašna.

### 6.3. Udarne radnja loma

Određivanje udarne radnje loma provodilo se na Charpye-vom batu prema normi EN ISO 179-1. Tijekom ispitivanja udarne radnje loma u tablicu su bilježeni iznosi energije koja je utrošena za lom ispitnog uzorka u ( $\text{J/mm}^2$ ).

Na temelju tih podataka izračunata je udarna radnja loma i rezultati su prikazani u tablicama 23, 24, 25.

**Tablica 23. Udarne radnja loma za WPC 70/30**

EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA [ $\text{J/mm}^2$ ]	[ $\text{kJ/m}^2$ ]
1	9,7	3,5	62	0,038	37,55
2	10,1	3,3	62	0,038	38,25
3	9,6	3,28	62	0,037	37,37
4	10,4	3,82	62	0,025	24,68
5	9,9	3,31	62	0,048	47,88
$\bar{X}$				0,034	34,46

**Tablica 24. Udarne radnja loma za WPC 60/40**

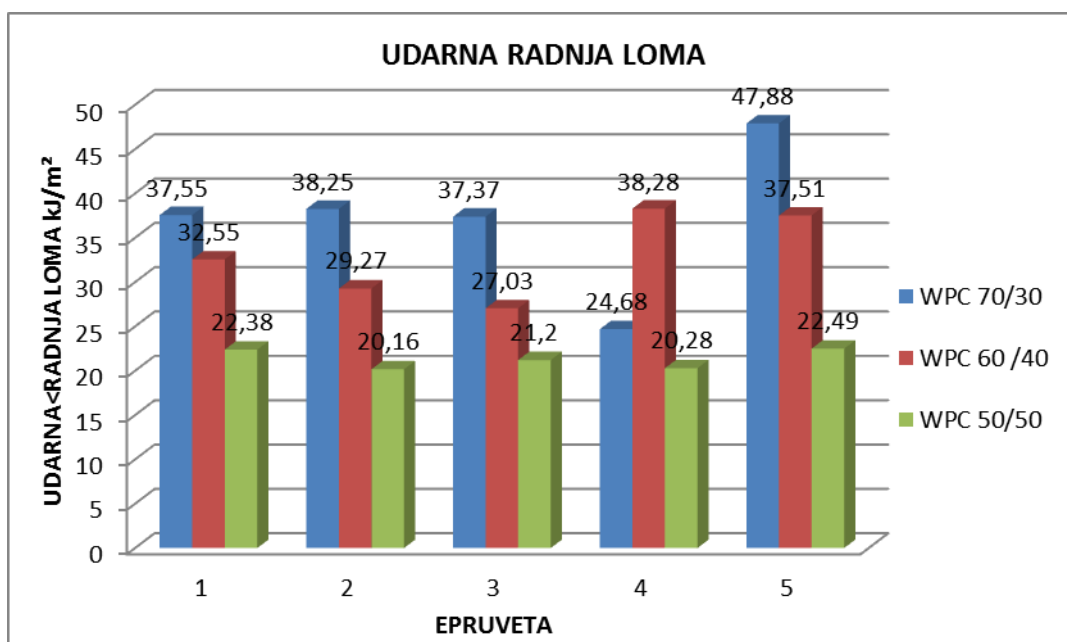
EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA [ $\text{J/mm}^2$ ]	[ $\text{kJ/m}^2$ ]
1	10,5	3,73	62	0,033	32,55
2	9,7	3,8	62	0,029	29,27
3	9,7	3,74	62	0,027	27,03
4	9,8	3,66	62	0,038	38,28
5	10	3,66	62	0,038	37,51
$\bar{X}$				0,032	31,78

**Tablica 25. Udarne radnja loma za WPC 50/50**

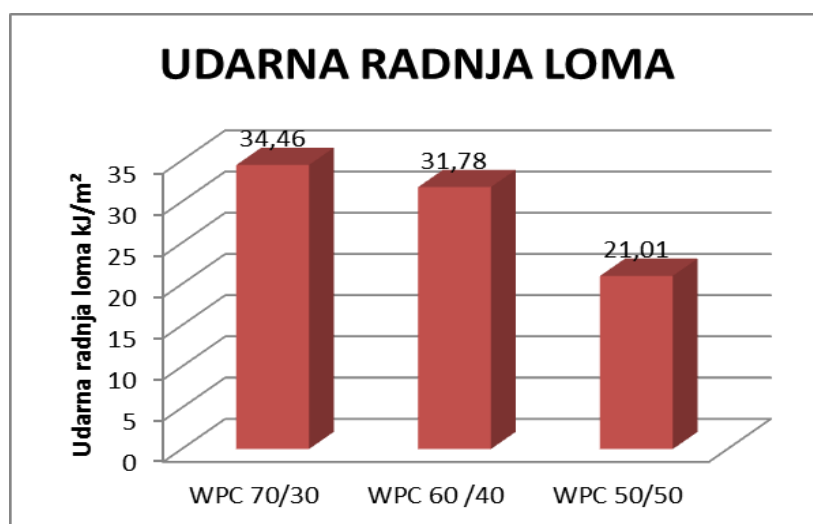
EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA [ $\text{J/mm}^2$ ]	[ $\text{kJ/m}^2$ ]
1	9,8	3,8	62	0,022	22,38
2	9,5	3,84	62	0,02	20,16
3	10,4	3,78	62	0,021	21,2
4	9,8	3,8	62	0,02	20,28
5	10,2	3,72	62	0,022	22,49
$\bar{X}$				0,021	21,01

Na slici 60 grafički su prikazani rezultati udarne radnje loma ispitivanih epruveta za WPC, a srednje vrijednosti udarne radnje loma prikazane su na slici 61.





Slika 60. Vrijednosti udarne radnje loma ispitivanih epruveta WPC



Slika 61. Srednje vrijednosti udarne radnje loma WPC

Kod prikazanih srednjih vrijednosti na slici 61 vidljiv je trend smanjenja udarne radnje loma u rezultatima, isto tako može se zaključiti da se udarna radnja loma za WPC epruvete s povećanjem udjela drvnog brašna u epruvetama smanjuje.

U tablicama 26, 27 i 28 prikazani su rezultati udarne radnje loma za WPC s dodatkom reciklirane gume.

Tablica 26. Udarne radnja loma za WPC 70/30 s dodatkom reciklirane gume

EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA[J/mm <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
1	9,6	3,67	62	0,039	38,97
2	9,9	3,72	62	0,048	47,93
3	9,6	3,7	62	0,041	41,41
4	9,7	3,72	62	0,035	35,33
5	9,6	3,7	62	0,039	38,65
$\bar{X}$				0,041	40,91

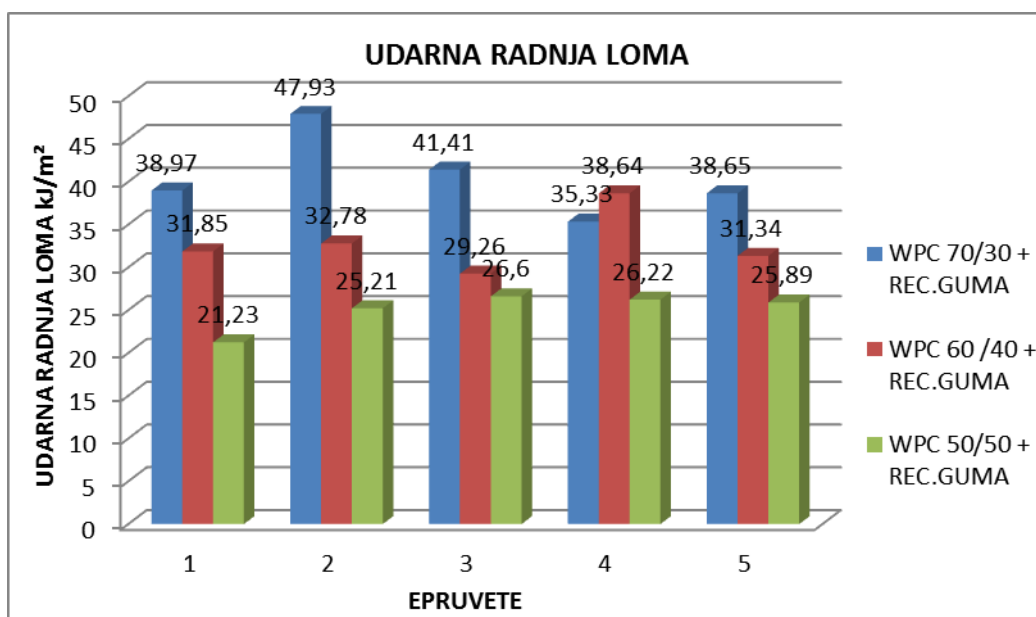
Tablica 27. Udarne radnja loma za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume

EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA[J/mm <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
1	9,8	3,77	62	0,032	31,85
2	10,4	3,74	62	0,033	32,78
3	9,6	3,84	62	0,029	29,26
4	9,4	3,78	62	0,039	38,64
5	9,7	3,71	62	0,031	31,34
$\bar{X}$				0,033	33,13

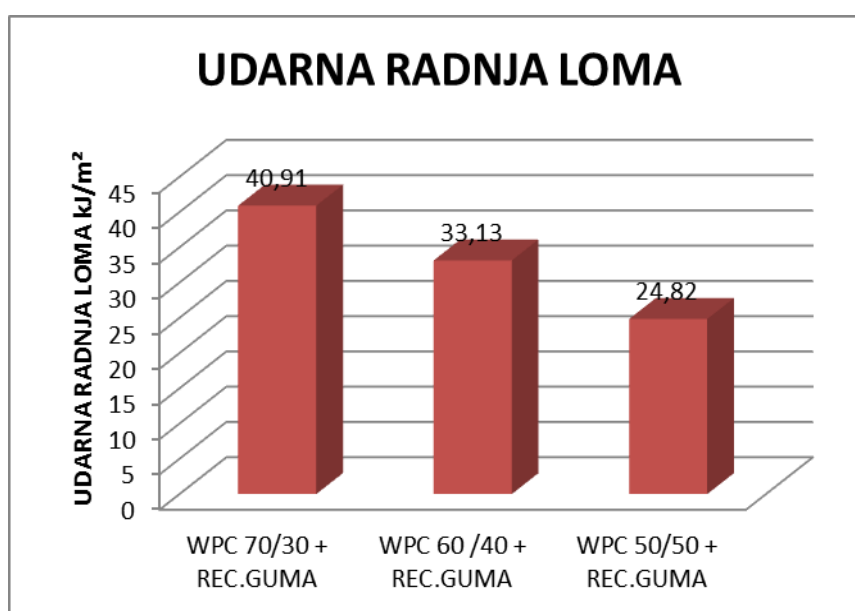
Tablica 28. Udarne radnja loma za WPC 50/50 s dodatkom reciklirane gume

EPRUVETA	b [mm]	h [mm]	L [mm]	UDARNA RADNJA LOMA[J/mm <sup>2</sup> ]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
1	9,8	3,77	62	0,021	21,23
2	10,4	3,74	62	0,025	25,21
3	9,6	3,84	62	0,027	26,6
4	9,4	3,78	62	0,026	26,22
5	9,7	3,71	62	0,026	25,89
$\bar{X}$				0,025	24,82

Rezultati ispitivanja udarne radnje loma za WPC epruvete s dodatkom reciklirane gume grafički su prikazani za svih pet epruveta na slici 62. Srednje vrijednosti udarne radnje loma za WPC s dodatkom gume također su prikazane grafički na slici 63. Usporedbu srednjih vrijednosti udarne radnje loma za WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume prikazuje slika 64.

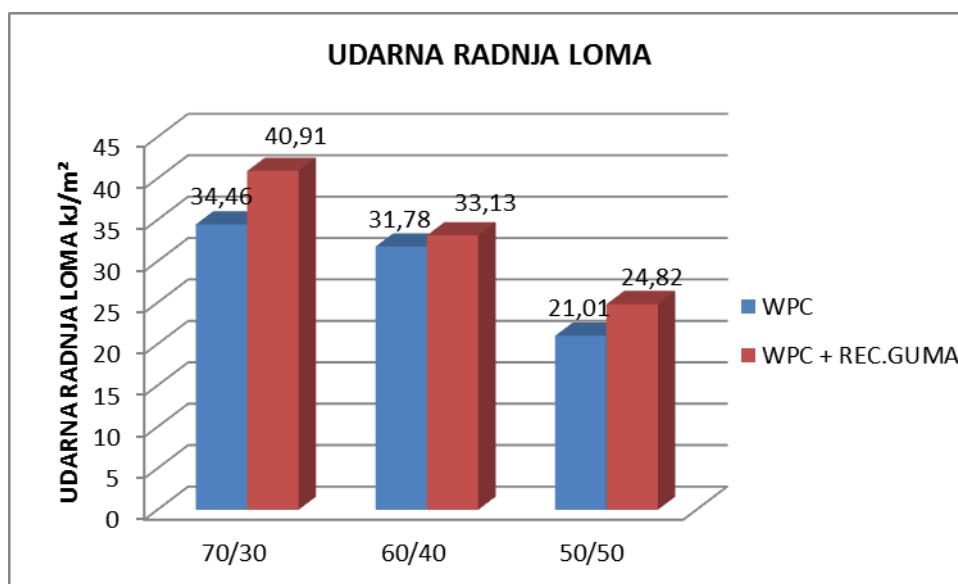


Slika 62. Grafički prikaz udarne radnje loma WPC sa dodatkom recuklirane gume



Slika 63. Srednje vrijednosti udarne radnje loma WPC sa dodatkom reciklirane gume

Udarne radnje loma kod epruveta sa dodatkom reciklirane gume odvija se jednako kao i kod epruveta bez gume, odnosno kao što prikazuje slika 63 s porastom udjela drvnog brašna smanjuje se udarna radnja loma.



**Slika 64. Usporedba srednje vrijednosti udarne radnje loma  
WPC i WPC s dodatkom gume**

Usporedbom udarne radnje loma epruveta WPC i WPC s recikliranom gumom može se sa slike 64 primijetiti da se udarna radnja loma smanjuje povećanjem udjela drvnog brašna. Analizirajući grafički prikaz dolazi se do zaključka da udarna radnja loma epruveta s recikliranom gumom viša u odnosu na epruvete bez gume te da dodatkom gume povisujemo udarnu radnju loma.

#### 6.4. Tvrdća

Ispitivanje se provodilo na tvrdomjeru s kuglicom proizvođača Zwick prema normi EN ISO 2039-1, promjer kuglice od kaljenog čelika je 5 mm. Očitava se dubina prodiranja za vrijeme djelovanja opterećenja nakon 10s, 30s i 60s.

Dobiveni rezultati tvrdoće prikazani su u tablicama. U tablici 29 nalaze se srednje vrijednosti tvrdoće za WPC a u tablici 30 prikazane su srednje vrijednosti za WPC s dodatkom reciklirane gume.

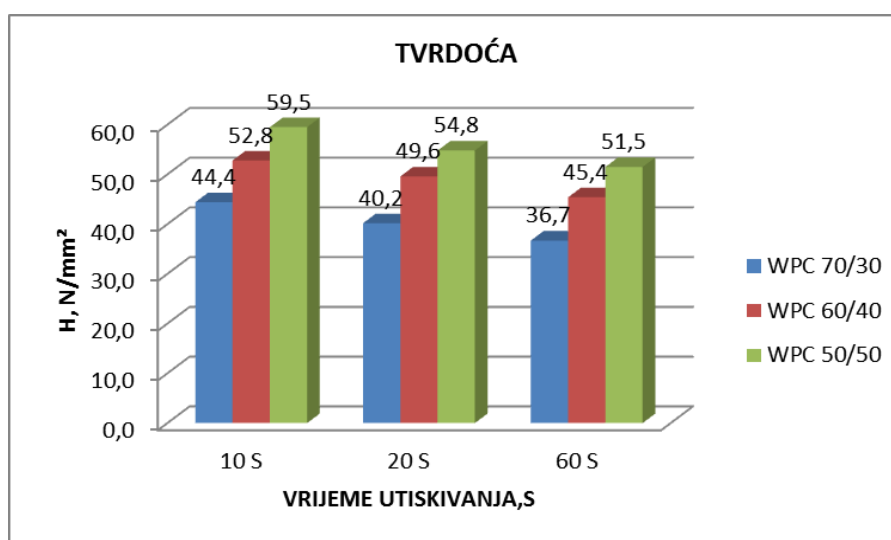
**Tablica 29. Srednje vrijednosti tvrdoće za WPC**

VRIJEME UTISKIVANJA KUGLICE, S	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	WPC 70/30	WPC 60/40	WPC 50/50
10 S	44,4	52,8	59,5
20 S	40,2	49,6	54,8
60 S	36,7	45,4	51,5

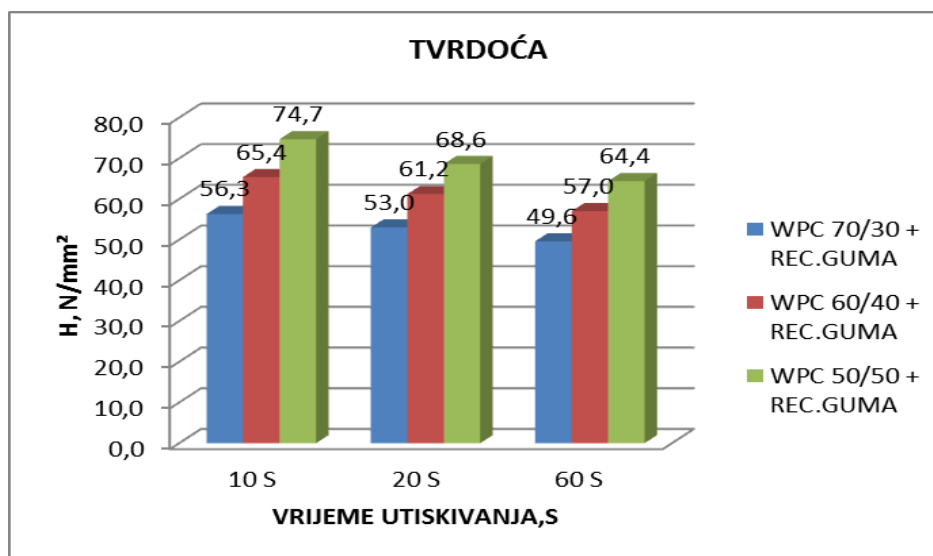
Tablica 30. Srednje vrijednosti tvrdoće za WPC s dodatkom reciklirane gume

VRIJEME UTISKIVANJA KUGLICE, S	TVRDOĆA, N/mm <sup>2</sup>		
	WPC 70/30	WPC 60/40	WPC 50/50
10 S	44,4	52,8	59,5
20 S	40,2	49,6	54,8
60 S	36,7	45,4	51,5

Rezultati tvrdoće prikazani su grafički. Na slici 65 prikazana je tvrdoća za WPC dok slika 66 prikazuje tvrdoću za WPC s dodatkom reciklirane gume. Usporedba tvrdoće oba uzoraka epruveta prikazuje slika 67.

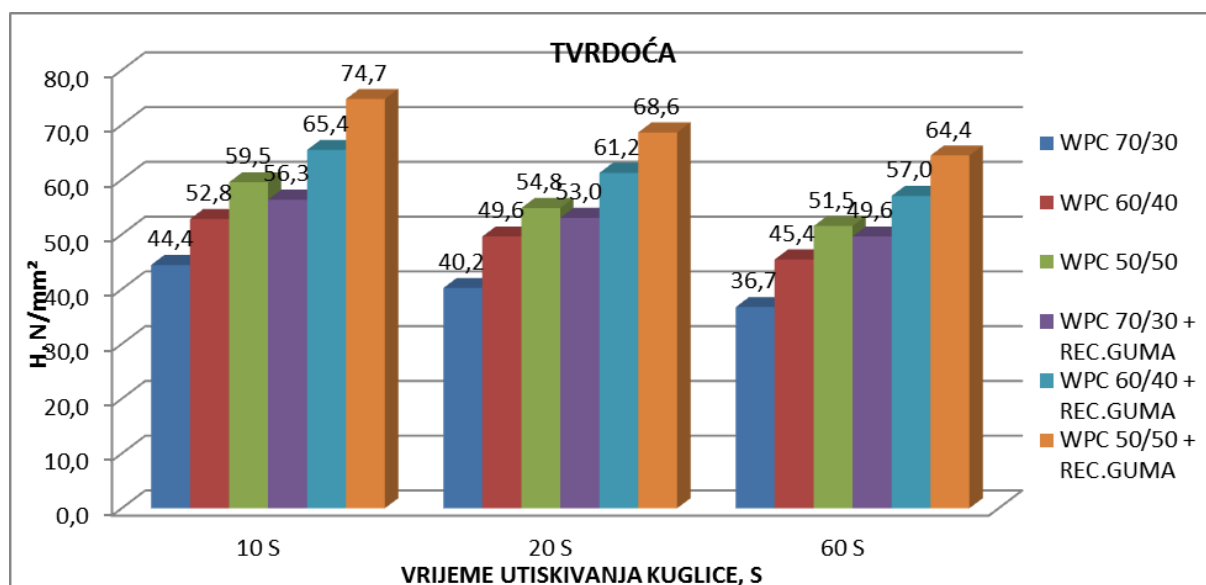


Slika 65. Grafički prikaz tvrdoće WPC



Slika 66. Prikaz tvrdoće WPC s dodatkom reciklirane gume

Kod epruveta WPC i epruveta WPC s dodatkom reciklirane gume tvrdoća raste s povećanjem udjela drvnog brašna, što se može vidjeti na slici 65 i slici 66.



Slika 67. Usporedba tvrdoće WPC i WPC sa dodatkom reciklirane gume

Iz grafičkog prikaza slike 67 može se zaključiti da je tvrdoća kod epruveta sa dodatkom reciklirane gume veća u odnosu na epruvete bez gume.

#### 6.5. Postojanost oblika pri zagrijavanju po Vicat- u ( temperatura omekšavanja)

Ispitivanje se provodilo prema normi HRN EN ISO 306 na uređaju za određivanje temperature plastomera po Vicat-u, proizvođač VEB Thüringer Industriewerk. Promjer igle koji prodire u epruvetu je 1 mm. Tijekom ispitivanja bilježe se temperature  $T_1$  i  $T_2$  i računa se srednja temperatura (VST) na kojoj igla prodire u epruvetu [tablica 31, tablica 32, tablica 33].

Tablica 31. Temperature omekšavanja za WPC 70/30

EPRUVETA	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	VST, $^\circ\text{C}$
1	85	90	87,5
2	88	93	90,5
3	91	96	93,5
$\bar{X}$			90,3

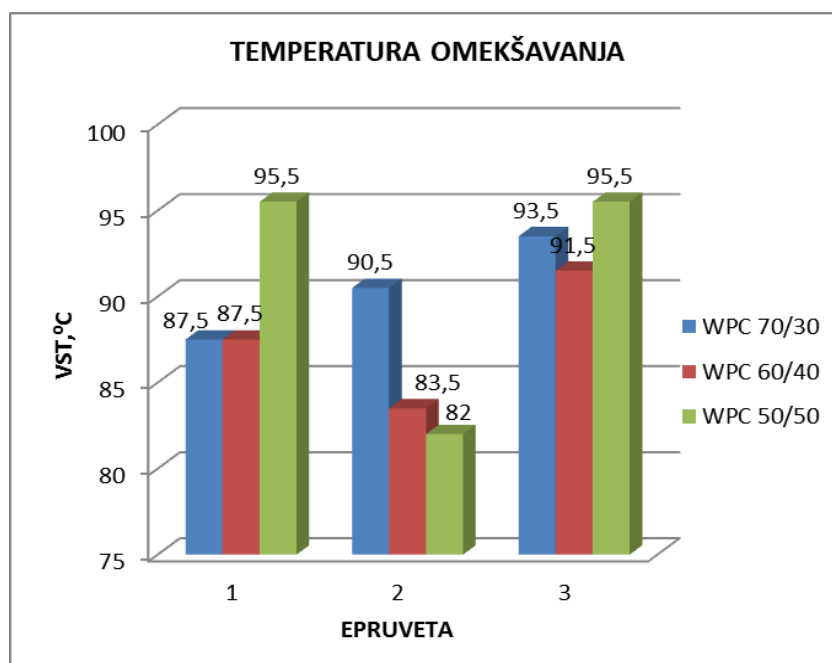
Tablica 32. Temperature omekšavanja za WPC 60/40

EPRUVETA	T <sub>1</sub> , °C	T <sub>2</sub> , °C	VST, °C
1	90	84	87,5
2	87	80	83,5
3	92	91	91,5
$\bar{X}$			87,3

Tablica 33. Temperatura omekšavanja za WPC 50/50

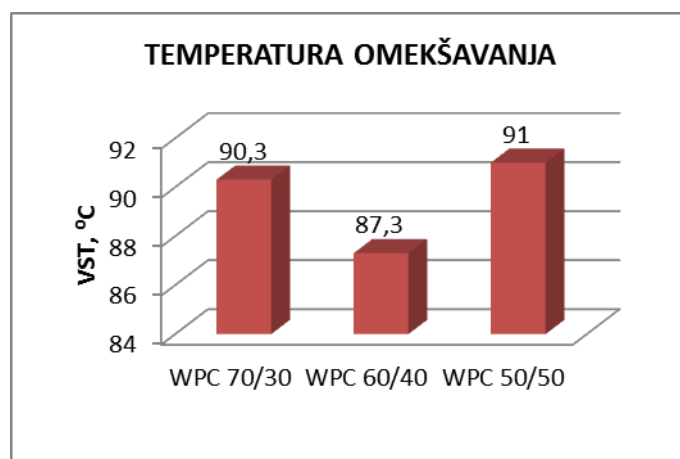
EPRUVETA	T <sub>1</sub> , °C	T <sub>2</sub> , °C	VST, °C
1	95	96	95,5
2	79	85	82
3	95	96	95,5
$\bar{X}$			91

Na slici 68 grafički je prikazana temperatura ispitivanih epruveta a slika 69 prikazuje srednje temperature omekšavanja za WPC.



Slika 68. Temperatura omekšavanja ispitivanih epruveta WPC

Kod temperature omekšavanja vidljiva su na slici 68 prilična odstupanja u rezultatima. Može se primijetiti da kod epruvete 2 temperatura omekšavanja pada s porastom udjela drvnog brašna dok kod epruvete 1 s porastom udjela brašna temperatura raste.



Slika 69. Srednja temperatura omekšavanja WPC

Uzimajući u obzir podatke za WPC 70/30 i 50/50 može se doći do zaključka ta temperatura omekšavanja raste s povećanjem udjela drvnog brašna.

U tablici 34, 35, 36 se nalaze podaci o  $T_1$  i  $T_2$  za WPC s dodatkom reciklirane gume i podaci o srednjoj temperaturi omekšavanja za WPC sa dodatkom reciklirane gume.

**Tablica 34. Temperatura omekšavanja za WPC70/30 s dodatkom reciklirane gume**

EPRUVETA	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	VST, $^\circ\text{C}$
1	82	89	85,5
2	82	89	85,5
3	82	89	85,5
$\bar{X}$			85,5

**Tablica 35. Temperature omekšavanja za WPC 60/40 s dodatkom reciklirane gume**

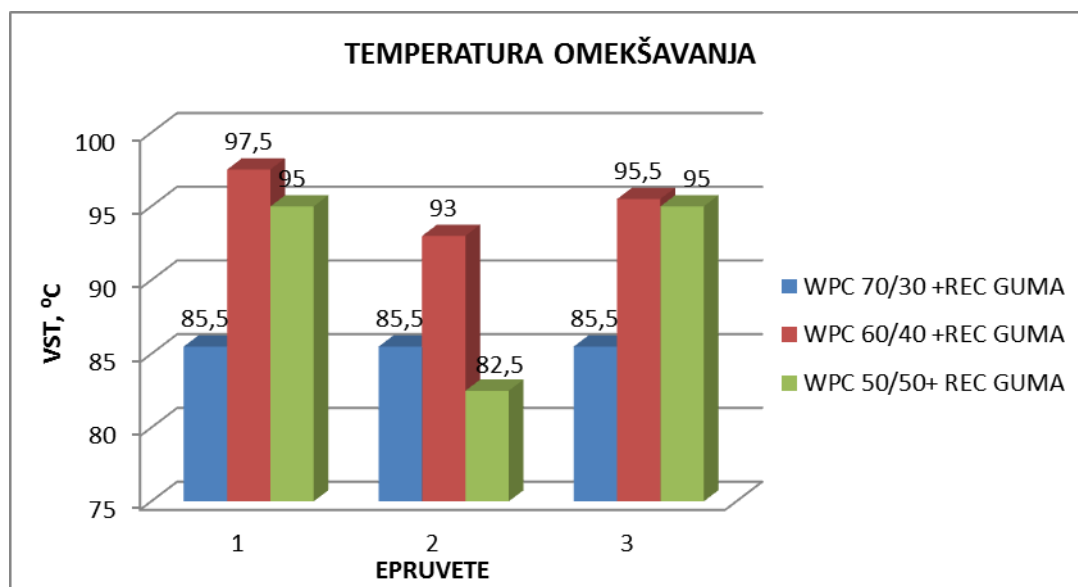
EPRUVETA	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	VST, $^\circ\text{C}$
1	94	101	97,5
2	90	96	93
3	93	98	95,5
$\bar{X}$			95,3

**Tablica 36. Temperature omekšavanja za WPC 50/ 50 s dodatkom reciklirane gume**

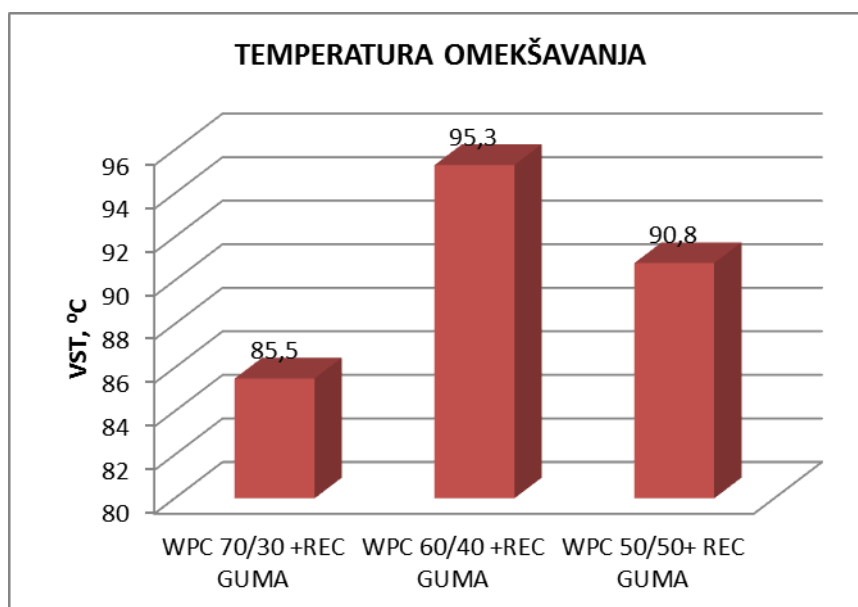
EPRUVETA	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	VST, $^\circ\text{C}$
1	94	96	95
2	81	84	82,5
3	94	96	95
$\bar{X}$			90,8



Temperatura omekšavanja za sve tri ispitivane WPC epruvete s dodatkom reciklirane gume prikazana je na slici 70. Srednje vrijednosti temperature omekšavanja prikazuje slika 71 a grafikon usporedbe temperature omekšavanja za oba uzoraka prikazuje slika 72.



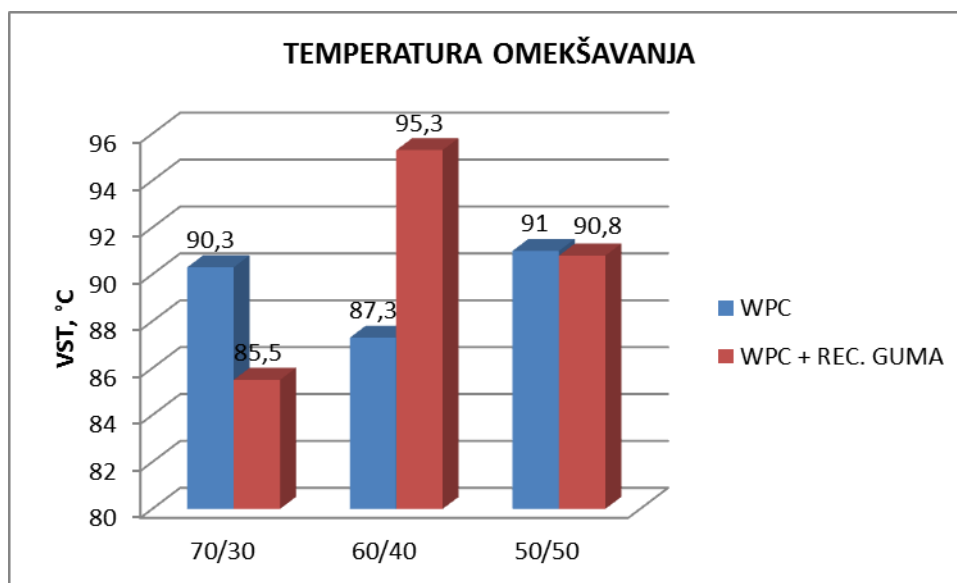
Slika 70. Prikaz temperature omekšavanja za ispitivan epruvete WPC s dodatkom reciklirane gume



Slika 71. Srednje vrijednosti temperature omekšavanja WPC s dodatkom reciklirane gume u ovisnosti o udjelu brašna

Isto kao i kod epruveta bez gume i ovdje se pojavljuju odstupanja u rezultatima srednje vrijednosti temperature omekšavanja što je vidljivo iz grafičkog prikaza na slici 72.

Međutim uzimajući u obzir epruvete sa drvnim udjelom od 30% i 50% zaključuje se da temperature omekšavanja rastu s povećanjem udjela drvnog brašna. Epruvete bez gume imaju nešto višu temperaturu omekšavanja u odnosu na epruvete sa dodatkom gume.



**Slika 72. Grafički prikaz usporedbe temperature omekšavanja WPC i WPC s dodatkom reciklirane gume**

## 7. ZAKLJUČAK

Biokompoziti su materijali gdje se kao matrica koristi polimer a kao ojačalo prirodna vlakna. Jedan od veliki nedostataka sadašnjih kompozitnih materijala poput kompozita s staklenim ili ugljičnim vlaknima je recikliranje pa stoga kompoziti s prirodnim vlaknima odnosno biokompoziti imaju sve veću primjenu i svijetlu budućnost upravo iz razloga što su prirodna vlakna biorazgradiva, dobivaju se iz obnovljivih izvora, lako se oporabljuju, te je mali utrošak energije potreban za preradbu. Kod WPC kompozita koristi se najčešće drveno brašno kao ojačalo koje se dobiva iz ostataka nakon obrade drva.

Pritisci na industriju u pogledu oporabljivosti i održivog razvoja svakodnevno rastu, te ovakvo iskorištavanje materijala na koje se gleda kao da je otpad, daje potporu načelima održivog razvoja.

Najveći udio u proizvodnji polimera s prirodnim vlaknima zauzima drvo upravo iz razloga njegove dostupnost te što ga ima više od svih drugih prirodnih sirovina za upotrebu u kompozitima.

Cilj diplomskog rada bio je proizvesti drveno polimerni kompozit i ispitati njegova mehanička svojstva. Na temelju dobivenih rezultata dati zaključke te navesti moguću primjenu drveno polimernog kompozita. Ispitivala se vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, savojna čvrstoća i savojni modul, udarna radnja loma, tvrdoća i temperatura postojanosti oblika odnosno temperatura omekšavanja.

Nakon provedenih ispitivanja mehaničkih svojstava i dobivenih rezultata došlo se do zaključaka. Iako se u rezultatima vlačne čvrstoće i modula elastičnosti te posebno kod određivanja temperature omekšavanja pojavila odstupanja možemo zaključiti slijedeće:

- Vrijednosti vlačne čvrstoće kod WPC uzoraka s gumom i WPC uzoraka bez gume se smanjuju s porastom udjela drvnog brašna i vrijednosti vlačne čvrstoće veće su kod uzoraka koji su bez gume nego kod uzoraka s gumom. Pad čvrstoće može se pripisati nedovoljnoj povezanosti čestica ojačala i matrice.
- Vrijednosti vlačnog modula elastičnosti s povećanjem udjela drvnog brašna rastu kod oba uzoraka. Vrijednosti vlačnog modula elastičnosti kod uzoraka bez gume nešto su veće nego kod uzoraka sa gumom, što se i moglo očekivati jer je modul elastičnosti mjera za krutost materijala a dodani elastomer smanjuje krutost.
- S porastom udjela drvnog brašna vrijednosti savojne čvrstoće se smanjuju te su vrijednosti savojne čvrstoće veće kod WPC uzoraka bez gume.

- Vrijednosti savojnog modula kod WPC uzoraka rastu s porastom udjela drvnog brašna dok kod uzoraka s dodatkom gume se vrijednosti savojnog modula smanjuju. Uzorci s dodatkom gume imaju nešto veći savojni modul u odnosu na uzorke bez gume.
- Vrijednosti udarne radnje loma kod uzoraka s dodatkom reciklirane gume su veće što se moglo i očekivati radi samog dodatka 5% reciklirane gume. Vrijednost udarne radnja loma smanjuje se s porastom udjela drvnog brašna.
- Kod WPC uzoraka i WPC uzoraka s dodatkom reciklirane gume vrijednosti tvrdoće rastu s povećanjem udjela drvnog brašna. Vrijednosti tvrdoće kod uzoraka s dodatkom reciklirane gume veće su u odnosu na uzorke bez dodatka reciklirane gume, što se može objasniti povećanjem gustoće materijala uslijed povećane ukupne količine dodataka.
- Vrijednosti temperature omekšavanja rastu s povećanjem udjela drvnog brašna te su kod uzoraka bez gume vrijednosti temperature omekšavanja nešto više u odnosu na uzorke sa dodatkom gume.

Na temelju dobivenih rezultata drveno polimerni kompoziti koje smo dobili mogli bi naći primjenu kod nekih nenosivih dijelova, koji nisu izrazito opterećeni.. Kako su drveno polimerni kompoziti postojani na vremenske uvijete, vodu i plijesan mogu se primjenjivati i na otvorenome prostoru, gdje bi samo drvo bilo neprikladno. Stoga bi drveno polimerni kompoziti mogli primijeniti kod vanjskog oblaganja terasa, zvučnih zidova na autocestama, kod izrade stepeništa. Također se mogu primijeniti kod unutarnjeg oblaganja zidova, odnosno kao pregradni zidovi, za podove, odnosno tamo gdje dodatak drva stvara bolji ugođaj.

Kod dijelova koji su izloženi udarcima, mogli bi primijeniti WPC sa dodatkom gume jer guma ima svojstvo dobre otpornosti na udar, također se mogu WPC sa dodatkom gume primijeniti do temperatura od 95°C.

Iz ovog rada moguće je zaključiti da WPC kompoziti sa svojim prednostima imaju široku primjenu u budućnosti, međutim trebala bi daljnja istraživanja u kojima bi se još poradilo na mehaničkim svojstvima.

## **8. LITERATURA**

- [1] Schauerl, Z. Kompozitni materijali („kompoziti)
- [2] Rujnić- Sokele, M., Šercer, M., Bujanić, B . Utjecaj recikliranja na mehanička svojstva drvno- plastomernoga kompozita
- [3] Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, Susan E. Selke, Bruce R. Harte, and Georg Hinrichsen. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites
- [4] Marić, G. Biokompoziti, PP predavanja
- [5] Španić, N., Jambreković, V., Antonović, A. Osnovni materijali za proizvodnju drvno-plastičnih kompozita
- [6] Čatić, I. Proizvodnja polimernih tvorevina
- [7] Škobalj, D. Kompoziti drvo plastika- mogućnost kombiniranja plastike i drva, članak
- [8] Franz, M. Mehanička svojstva materijala, Zagreb, 1998